



EESTI MAAÜLIKOOL  
Põllumajandus- ja keskkonnainstituut

Priit Kappak

**AEROLASERSKANEERIMISE (ALS) ANDMESTIKU  
KASUTAMISVÕIMALUSTEST PÕLEVKIVI KAEVANDAMISE  
MÕJUDE UURIMISEL**

POSSIBLE APPLICATIONS OF AIRBORNE LASER SCANNING (ALS)  
DATA FOR EXPLORING THE IMPACTS FROM OIL SHALE MINING

Magistritöö  
Linna- ja tööstusmaastike õppekava

Juhendaja: Kalev Sepp, *PhD*

Kaasjuhendaja: Ants Vain, *PhD*

Tartu 2017

# Sisukord

Sissejuhatus .....	5
1. Põlevkivitööstus Eestis .....	7
1.1. Pealmaakaevandamine .....	8
1.2. Allmaakaevandamine .....	9
1.3. Põlevkivi altkaevandamise keskkonnamõjud .....	12
2. Aerolaserskaneerimine .....	15
2.1. Aerolaserskaneerimise mõõdistustäpsus .....	16
2.2. Aerolaserskaneerimise kasutus Eestis .....	18
3. Materjal ja meetodika .....	21
4. Tulemused ja arutelu .....	24
4.1. Maapinna vajumite määratlemine .....	24
4.2. Kaevandusvaringutest põhjustatud maapinna vajumid .....	28
4.2.1. Estonia kaevandus .....	29
4.2.2. Sompa kaevandus .....	33
4.2.3. Tammiku kaevandus .....	33
4.2.4. Kaevandus nr 2 .....	34
4.2.5. Kukruse kaevandus .....	35
4.2.6. Kohtla kaevandus .....	35
4.2.7. Käva kaevandus .....	35
4.2.8. Ahtme kaevandus .....	36
4.2.9. Viru kaevandus .....	37
4.2.10. Kaevandus nr 4 .....	37
4.3. Kohapealne vaatlus .....	37
Kokkuvõte .....	39
Kasutatud kirjandus .....	41
LISAD .....	44
Lisa 1. Estonia kaevandusala reljeefi muutuste profiilid .....	45
Lisa 2. Sompa kaevanduse ala reljeefi muutuse profiil .....	48
Lisa 3. Tammiku kaevandusala reljeefi muutuste profiilid .....	49
Lisa 4. Kaevandus nr 2 ala reljeefi muutuse profiilid .....	50
Lisa 5. Kukruse kaevandusala reljeefi muutuse profiilid .....	51
Lisa 6. Kohtla kaevandusala reljeefi muutuse profiil .....	52
Lisa 7. Käva kaevandusala reljeefi muutuse profiil .....	53
Lisa 8. Estonia kaevandus .....	54
Lisa 9. Sompa kaevandus .....	55
Lisa 10. Tammiku kaevandus .....	56
Lisa 11. Kaevandus nr 2 .....	57
Lisa 12. Kukruse kaevandus .....	58
Lisa 13. Kohtla kaevandus .....	59
Lisa 14. Käva kaevandus .....	60
Lisa 15. Ahtme kaevandus .....	61
Lisa 16. Viru kaevandus .....	62
Lisa 17. Kaevandus nr 4 .....	63

## Sissejuhatus

Eestis on alates 2008. aastast kasutatud maapinna kaardistamiseks lisaks aeropildistamisele ka aeromõõdistamist. Aerolaserskaneerimise eeliseks on suure maa-ala mõõdistamine lühikese aja jooksul. Mõõdistusandmed võimaldavad jälgida maapinnal esinevaid looduslikke ja tehisklikke protsesse. Andmeid saab kasutada näiteks suurte taristute eelprojektide koostamiseks, suurveest ohustatud alade modelleerimiseks, metsamõõdistamisel ja mujal (Gruno 2012). Aeromõõdistuse oluliseks väljundiks on maapinnamudel, mida saab kasutada näiteks tööstuse alade uurimisel.

Ühe suurima mõju maapinna muutusele toob endaga maavara kaevandamine. Eestis on kõige mastaapsema keskkonnamõjuga põlevkivitööstus, mida on kaevandatud ligikaudu 100 aastat. Allmaakaevandamise tulemusena on maapinnale tekkinud vajumid- nii sihilikult varistatud kaevandamise käigus kui ka tahtmatute varingute tõttu. Tekkinud on kuni 1,5 meetri sügavused sulglohud, kus võivad pinnavee kogunemisel mullad soostuda. Samuti võivad kahjustada saada maaparandussüsteemid (Leedu 2010). Seega on oluline teada, kus varingud asuvad ning kus nad võivad tekkida, et ennetavalt tegutseda.

Käesoleva töö eesmärgiks on uurida, kuidas aerolaserskaneerimise mõõdistus võiks kasulik olla põlevkivikaevanduste keskkonnamõjude tuvastamisel. Antud töö kontekstis vaadeldakse kaevanduste mõjuna ainult maapinna vajumeid, mis on tekkinud kaevandusvaringute tõttu. Neid varinguid on läbi aastakümnete olnud palju, mõnda neist on tuvastanud ka seismojaamad (Soosalu 2009). Oluline on varingute täpse asukoha kindlaks tegemine, et saada teadmisi kaevandatud alade mõjudest ka peale kaevandustegevuse lõppemist. Antud töö eesmärgid on:

- 1) Välja töötada meetod, kuidas LiDAR-i andmete alusel kindlaks teha kaevandusvaringule viitavaid alasid;
- 2) Tuvastada kaevandusvaringute poolt põhjustatud maapinnavajumeid 2009. ja 2013. aasta vahemikus.

Maapinna vajumite uurimise peamiseks allikaks on Maa-ameti poolt LiDAR-i andmestiku alusel koostatud maapinnamudelid. Kuna käesoleva töö koostamisel on Ida-Virumaad mõõdistatud aastatel 2009 ja 2013, siis kogu töö annab vajumite hinnangu ainult nelja aasta ulatuses. Maapinnamudelite võrdlusel on võimalik hinnata reljeefi muutusi ning seoseid kaevandustegevusega.

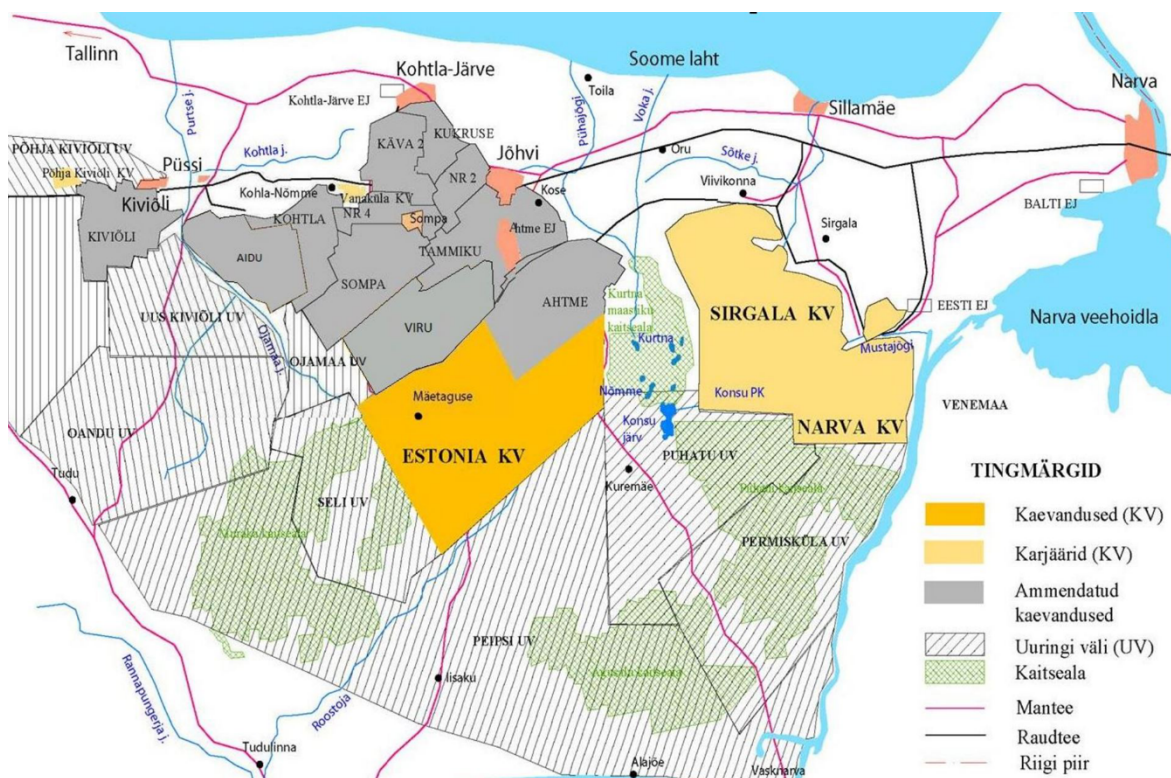
Töö on jaotatud neljaks peatükiks, kus esimeses kahes on toodud kirjanduse ülevaated põlevkivi kaevandamisest ja aerolaserskaneerimisest. Kolmandas peatükis käsitletakse maapinna vajumite arvutamise metoodikat. Neljandas peatükis esitatakse tulemuste analüüs ja arutelu.



## 1. Põlevkivitööstus Eestis

Põlevkivi kaevandamisega alustati Eestis 20. sajandi alguses, täpsemalt 1916. aastal Ida-Virumaal (Reinsalu, 2010). Põlevkivitööstuse kõrgajaks kujunes 20. sajandi keskpaik, kui põlevkivi kaevandati Eesti ja Venemaa loodepiirkonna energiavajaduse katmiseks. Algusaastatel kaevandati põlevkivi õli utmiseks, seejärel majapidamisgaasi tootmiseks ning alates 1950-ndatest peamiselt elektrienergia tootmiseks. Suurim aastane põlevkivi väljamine, üle 30 miljoni tonni, saavutati 1980. aastal (Reinsalu 2011).

Ligikaudu 100 aasta jooksul on Eestis olnud 22 põlevkivikaevandust ja -karjääri (joonis 1), kus 2015. aasta seisuga toimus maavara kaevandamine järgnevates maardlates: Ahtme kaevandus, Estonia kaevandus, Narva karjäär (Narva põlevkivikarjäär II), Ojamaa kaevandus, Põhja-Kiviõli II karjäär, Sirgala II karjäär ja Ubja karjäär. Aastane põlevkivi toodang 2015. aastal oli umbes 15 miljonit tonni, millest ligikaudu 60% tuleb allmaakaevandustest ja 40% karjääridest (Maavaravarude koondbilansid 2016).



**Joonis 1.** Põlevkivikaevandused ja -karjäärid (Karlõp, Sokman 2017).

## 1.1. Pealmaakaevandamine

Pealmaakaevandamine on üks levinumaid ja soodsamaid viise maavara kaevandamiseks. Seda juhul kui katendi paksus ei ole väga suur. Ka Eesti põlevkivitööstuse algusaastatel alustati pealmaakaevandamisega kohtades, kus maavara kattev kiht oli kõige õhem (Reinsalu, 2010a). Üldjuhul on Eesti põlevkivimaardlates pealma- ja allmaakaevandamise valikukriteeriumiks katendi piirpaksus, milleks on umbes 27-30 m. Nimetatud piirpaksus on määratud peamiselt kasutusel olevate katendiekskavaatorite ehk draglainide EŠ15/90 maksimaalse töövõime alusel, mis on 27 m. Tehniliselt on võimalik pealmaakaevandamist kasutada ka paksema katendi korral, kuid siis tuleb kasutusele võtta abivahendid, mis aga muudaksid põlevkivi väljamise kulu oluliselt suuremaks (Reinsalu 2011).

Põlevkivikarjääris kasutatakse põlevkivi väljamiseks vaalkaevandamise tehnoloogiat (joonis 2). Põlevkivikihi kättesaamiseks tuleb esmalt eemaldada katend. Katendit saab omakorda jagada kaheks – pehmeks katendiks, mis koosneb peamiselt kvaternaarisetetest ja kaljuseks katendiks, mis koosneb kõvast paekivist (Põlevkivi arengukava). Katend teiseldatakse draglainidega puistangutesse ning maavara väljatakse buldooserkobestiga selektiivselt või puur-lõhketöödega (Reinsalu 2011).



**Joonis 2.** Põlevkivi kaevandamine, tänaseks juba suletud, Aidu karjääris (foto: Veiko Karu).

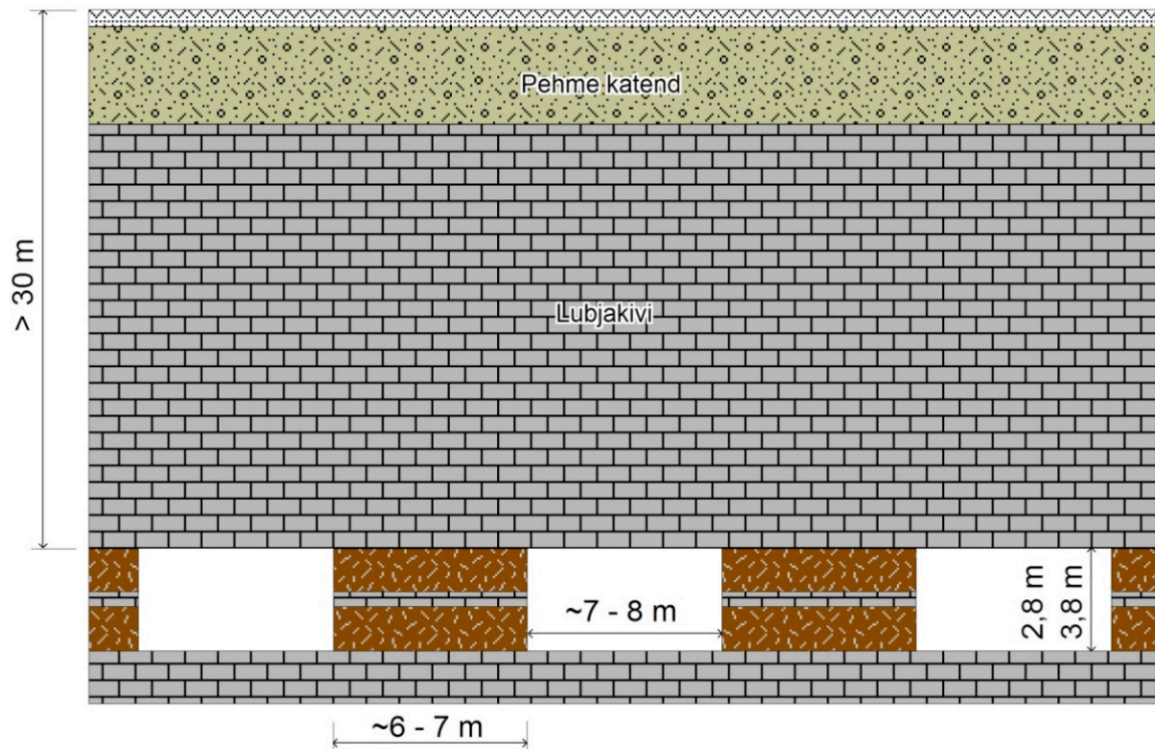
Traditsiooniliselt on põlevkivikihi kobestamine toimunud puur-lõhketöid kasutades. Sellisel viisil kobestatud mäemass laetakse kopplaaduri või ekskavaatoriga kalluritele, kaevis transporditakse purustus-sorteerimissõlme ja vajadusel rikastusvabrikusse. Sellist meetodit kasutati näiteks Aidu karjääris. Järjest enam aga leiab kasutust selektiivne väljamine, kus põlevkivikihi distillatsioonist eraldi kvaliteetsed põlevkivikihid ja vähem kvaliteetsed kihid. Selektiivseks väljamiseks kasutatakse buldooserile kinnitatud ripperkonksu või freeskombaini. Kobestatud või lahtifreesitud kaevis laetakse puisturi või kopplaaduriga kallurile ja transporditakse kaevis purustus-sorteerimissõlme. Seejuures sorditud toodang reeglina rikastamist ei vaja (Reinsalu *et al* 2002).

Pealmaakaevandamist kasutatakse Eestis Põhja-Kiviõli (Põhja-Kiviõli II) karjääris, Narva karjääris ja Ubja karjääris. Eelmainitud karjäärides kasutatakse selektiivset või osalis-selektiivset kaevandamist. Lausväljamist ehk ainult puur-lõhketöid kasutati Aidu karjääris, mis on juba suletud (Põlevkivi arengukava 2012; Maavaravarude koondbilanss 2015).

## **1.2. Allmaakaevandamine**

Allmaakaevandamise meetod võetakse kasutusele, kui katendi kiht on liiga paks, et selle puistangusse ladustamine majanduslikult ära tasuks. Eesti põlevkivimaardlates on olnud kasutusel mitmeid allmaakaevandamise tehnoloogiaid. Kõige kauem on kasutusel olnud kamberkaevandamise tehnoloogia. Seda hakati kasutama 1960-ndatel aastatel ja on siiaaani kasutusel. Tehnoloogia eripäraks on kambriplokid, mis on 300-400 m laiad ja 600-800 m pikad ning on jagatud kogumisstrekiga paremaks ja vasakuks tiivaks. Mäemassi raimamiseks kasutatakse peamiselt puur-lõhketöid, mille tulemusena tekivad 7-8 m laiused piki- ja põikikambrid. Kambrite vahele jäävad tulptervikud, mille küljepikkused on ligikaudu 6-7 m. Kambrite ja tervikute täpsed mõõtmed sõltuvad kaevanduse sügavusest, lae kõrgusest ja puur-lõhketööde kasutatavast ettenihke pikkusest. Väljatakse põlevkivikiht koos selle vahel lasuva paekihiga, mis tagab kambri kõrguse umbes 2,8 m (joonis 3). Ebapüsiva vahetu lae korral väljatakse ka see ning siis on kambri kõrgus kuni 3,8 m. Kambris on põhilised tööd soonimine, lõhkeaukude puurimine, lõhketööd, kaevis laadimine konveierile ja toestamine. Kambri edasinihe (lõhkeaukude pikkus) on üldjuhul 2-4 m. Viimasel ajal on rohkem kasutatud neljameetrist edasinihet, mille puhul on lõhkelaengud suuremad, mis omakorda suurendavad ka seismilisi laineid. Enamasti on tervikute tööeks arvestatud 2-5 aastat (Väizene 2015; Põlevkivi arengukava 2012). Estonia kaevanduses on tervikute tööga arvutuslikult igavene. Uuringute kohaselt on 20 aasta jooksul tervikud

purunenud 3,2-3,4 protsendilise tõenäosusega, kui varutegur on 1,1-1,4 (mis tähendab, et tervikud jäetakse varuteguri võrra suuremad kui minimaalselt vajalik). Maapinna vajumine varingu korral on keskmiselt kuni 1,5 m (Reinsalu 2010b).



**Joonis 3.** Põlevkivikaevanduse kambriploki ristlõike põhimõtteline skeem (Põlevkivi arengukava 2012).

Paarisstrekidega kaevandamine on sisuliselt kamberkaevandamine, kus kambrid rajati paneelstrekist kas ühele või mõlemale poole. Kambri maksimaalseks pikkuseks oli kuni 300 m ja laiuks 12-30 m. Kaevise väljamiseks kasutati puur-lõhketöid ja seejärel laeti kaevis käsitsi vagonettidesse. Väljatavas kihindis olnud lubjakivi paigutati väljatud alasse täiteriidana, mis oli mõeldud lae toestamiseks. Kvaliteetsete täiteriitade korral on maa vajumise sügavus kuni 0,7 m (Väizene *et al* 2014).

Paarislavadega kaevandamisel on langi pikkus kuni 600 m ja ee-rinna pikkus umbes 90 m. Lank jagatakse kogumisstrekiga paremaks ja vasakuks tiivaks. Lae ülalhoidmiseks kasutati metalltugesid. Kaevis väljati puur-lõhketöödega, kogupaksusega 2,3 m. Lubjakivitükid eraldati mäemassist ja laoti täiteriitadeks lae sujuvaks langetamiseks. Lae langetamise esialgne samm on umbes 15 m ja järgnevad sammud ee-rinna edasiliikumisel 5-7 m, mis määrab ka põhilae järelvajumise sammu. Lae langetamisel kaasnes maapinna vajumine kuni



0,9 m esimeste kuude jooksul ja järelvajumine 10-20 cm järgneva 2-4 aasta jooksul. Pärast seda perioodi võib maapinda lugeda deformeerituks ja püsivaks (Väizene *et al* 2014).

Kombainkaevandamine koos lae täieliku varistamisega töötati välja 1970-ndatel aastatel. Seda tehnoloogiat kasutati rohkem aladel, kus teised kaevandamise tehnoloogiad osutusid lae halva püsivuse tõttu võimatuks. Kombainkaevandamise põlevkivikaod moodustasid mäemassiivist ligikaudu 50%. Protsessis kasutati laavasid laiusega 150-170 m ja pikkusega 600-800 m. Kihindi väljamisel kasutati kitsahaardelist mäekombaini. Kombain raimas põlevkivikihi ning samal ajal laadis kaevist kraapkonveierile. Ligikaudu kolme meetri laiuses ee-rinnas hoitakse lagi üleval hüdrauliliste tugede abil. Töotsükli lõppedes liigutatakse masinad ja toestikud uude fronti, mille tulemusena laekivimid varisevad. Maapinna vajumise sügavus on ligikaudu 0,8-1,5 m (Väizene *et al* 2014).

Altkaevandatud maa stabiilsuse hindamiseks kasutatakse üldjuhul nelja jaotust:

1. Püsiv maa paikneb kaevanduse mäeeraldisel, kuid maavara selle all on jäänud väljamata. Tavaliselt jäetakse maavara väljamata mõne rajatise, looduskaitse või mõnel muul tehniliste kaalutluste põhjal. Püsival maal ei teki seetõttu ka maapinna vajumist (Reinsalu *et al* 2002).
2. Langetatud maa tekib alal, kus kaevandamisel ei jäetud tervikuid või kui jäeti, siis need olid mõeldud purunema. Langetud maa mikroreljeef sõltub lae käitlemise viisist, väljatud lasundi paksusest ja lasumi kooslusest (mida pudedam on vahetu lagi, seda väiksemad on ilmingud maapinnal). Maavara madala lasumise puhul on tehnogeenne mikroreljeef maapinnal selgelt näha ja kaardistamisel mõõdistatav. Kui kaevandamise sügavus on kuni 15 m, tekivad lae vajumisel maapinnale kontuuritavad praod, kuid 30-36 m sügavusel kaevandades selliseid pragusid ei esine. Suurimad vajumid (kuni paari meetri sügavused) tekkisid põlevkivimaardlas kui katsetati põlevkivikihi lausväljamist. Langetatud maal võib esineda ka väiksemaid järel- ja hilisvajumeid (Reinsalu *et al* 2002).
3. Stabiilne maa tekib kui maa alla jäetakse piisava tugevusvaruga tervikud ning kaevandamissügavus on 35-40 m. Oluliseks loetakse ka lasumi paksust käikude peal, mis peaks olema vähemalt 10-12 m. Väiksema paksuse korral võivad tekkida varingud. Suure tõenäosusega stabiilne maa hiljem ei vaju (Reinsalu *et al* 2002).
4. Kvaasistabiilne maa tekib kui lae ja maa hoidmiseks ettenähtud tervikud, täiteriidad ja muud toestikud ei purune kaevandamise ajal, kuid see võib toimuda hiljem. Kvaasistabiilseks maaks loetakse kambritega kaevandatud ala, kus kaevandamise sügavus

on suurem kui 35- 40 m (näiteks Estonia ja Viru kaevandused) ja käikude peal paiknev lasum on õhem kui 10-12 m. Kvaasistabiilsel alal võib maapinna vajumeid omakorda suurendada ka asjaolu, et kaevanduse sulgedes täitub see veega ning seetõttu tervikute tugevus aja jooksul nõrgeneb. Eestis on kvaasistabiilset ala umbes 70 km<sup>2</sup> (Reinsalu *et al* 2002).

### 1.3. Põlevkivi altkaevandamise keskkonnamõjud

Maavarade kaevandamisel on paratamatu, et see muudab keskkonda. Avakaevandamisel on muutused koheselt silmnähtavad– tekib uus mikroreljeef, muutub pinnas, taimestik ja isegi loomastik. Kui aga kaevandatakse maa all, ei tarvitse maakatte muutumine olla märgatav. Siiski on Eestis kohti, kus allmaatööd toimusid maapinna lähedal (15-20 m sügavusel) ning sellistel kaeveväljadel võib näha altkaevandatud alale omast mikroreljeefi (joonis 4). Maavara madala lasumise puhul võib ette tulla ka järsuseinalisi, kohati ka maa alla avanevaid varingauuke. Mida sügavamal aga kaevandamine toimub, seda vähem avaldab see mõju maapinnale (Reinsalu *et al* 2002).



**Joonis 4.** Maapinna vajumid peale lagede varistamist (foto: Karel Kravik).

Kõige suuremad muutused maapinnal seoses allmaakaevandamisega on tekkinud lauslangatamiste ja kaevandusjärgsete vajumistega (Reinsalu 2010b). Lauslangatuste puhul on madalate lohkude teke näha koheselt peale kaevandamistegevuse lõppemist. Vajumite sügavused on 0,7-1,0 m vahel ja nõlvakalded  $2^{\circ}$ - $5^{\circ}$ . Haritavatel põllumaadel võivad sellised kalded põhjustada ka kerget erosiooni (Toomik, Liblik 1998).

Kombainiga kaevandatud aladel tekivad sulglohud, muutub veerežiim ja sellest tingitult ka maakasutus. Paksema katendi puhul on tulemuseks muldade soostumine langatusaladel. Õhukese katendi puhul võivad langatuslohud jääda põuakartlikuks, kus valdavalt saavad kasvada ainult umbrohud. Mõlemal juhul saab aga rikutud maaparandusobjektide veerežiim (Leedu 2010).

Kamberkaevandamise tehnoloogiat kasutades tekivad teistlaadi vajumise ilmingud. Reeglina on kamberkaevandamise meetodit kasutades arvestatud, et tervikud peaksid vastu pidama pikka aega. Kuid siiski esineb tervikute purunemisi, mistõttu kajastub see ka maapinnal. Selliste purunemiste tõttu võib maapinnal tekkida kuni 1,5 m sügavused üksikud lohud, mille nõlvakalded võivad olla  $7^{\circ}$ - $11^{\circ}$  (Toomik, Liblik 1998). Paljudel juhtudel ilmnevad tõsisemad kaevandamisjärgsed varingud alles aastakümneid pärast kaevandamise lõppemist (Leedu 2010).

Suurim keskkonnamõju maapinna vajumisel tuleb peamiselt veetaseme tõusust, mis oluliselt muudab pinnase veerežiimi ja selle kaudu ka mullaviljakust. Veerežiimi muutuse mõju põllumaadele on varasemalt uuritud maa boniteedi ja saagikuse kaudu. Kuna saagikus sõltub palju ilmastikust, siis on ka tulemused suuresti erinevad. Uuringutes on leitud, et langatusega maa boniteet on võrreldes vajumata aladega alanenud 5-40 % ning põllukultuuride saagikus 15,9-96,9 % (Toomik 1999).

Põhjalikult on uuritud 1975. aastal tekkinud kaevandusvaringut Ahtme kaevanduses ja selle ala edasist arengut. Koheselt peale esialgseid vajumisi täitus ala veega ning tekkis ulatuslik soostunud ala. Suurvee ajal oli maksimaalne vee sügavus kohati kuni 1,5 meetrit, valdavalt aga jäi alla 0,5 meetri. Enne varingut oli ala kaetud 20-40 aasta vanuse metsaga, kus olid valitsevaks mustika ja naadi kasvukohatüübid. Peale varinguid on metsast alles vaid kuivanud, ligikaudu 2 meetri kõrgused puutüükad. 15 aasta jooksul on taimkatte areng allunud looduslike protsesside toimele, mille tulemusel on välja kujunenud madalsoole iseloomulik taimkate. Vajumi äärealale on tekkinud hallist lepast ning mõnest pajuliigist

koosnev mets, mis ulatub kuni kevadise suurvee maksimaalse veepiirini. Metsamajanduslikult on tegu väheväärtusliku metsaga (Rull *et al* 2005).

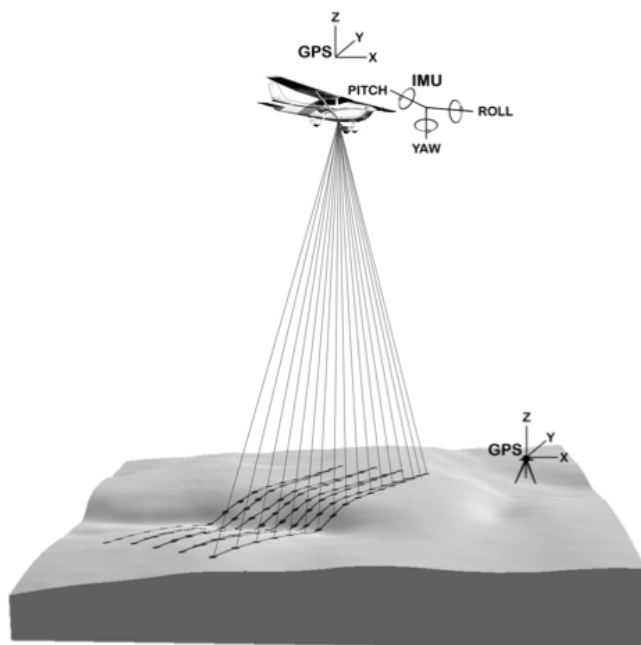
Kaevandusvaringute tuvastamist on uuritud TTÜ Mäeinstituudi poolt 2000-ndate alguses. Vajumite tuvastamiseks kasutati aerofotosi. Kõik kahtlust tekitavad alad vaadeldi kohapeal üle ning mõõdistati. Antud töös tõdeti, et selline meetod on väga ajakulukas, kuna ainult ortofotode järgi on vajumit keeruline tuvastada, sest varinguga sarnased objektid võivad osutuda raielankideks, kobraсте paisjärvedeks vms. Uuringus selgus, et kõige paremini on näha suured vajumid metsaaladel, kuid seda ka siis kui aastate jooksul on looduslikud protsessid juba toimunud ehk ala on soostunud. Halvemini on need tuvastatavad madala taimeestikuga aladel ja juba eelnevalt soostunud aladel (Niitlaan 2000).

Üldiselt on kujunenud seisukoht, et metsanduses ja põllumajanduses ootamatud maapinna vajumid katastroofilisi olukordi ei põhjusta. Küll aga vajavad kvaasistabiilsed alad mitmesuguseid järeleevenduse võtteid: rekultiveerimine ja deformeerunud alade nõlvakaldenurkade tasandamine, veekõrvaldussüsteemide parandamine jne. Kvaasistabiilsetel aladel tuleb vältida oluliste ehitiste ja rajatiste püstitamist (Liblik *et al* 2005).



## 2. Aerolaserskaneerimine

Aerolaserskaneerimiseks (ALS) nimetatakse õhusõiduki pardalt laserkiire abil teostatud mõõdistust. Laialdaselt kasutakse sünonüümina ka lühendit LiDAR (*Light Detection And Rangig*). Antud seadmega skaneerides kasutatakse kindla lainepikkusega laserkiirt ning registreeritakse objektilt tagasipeegeldunud valgus. Määratlemaks objekti asukohta ruumis kasutatakse samaaegselt ka GPS (*Global Positioning System*) ning IMU (*Inertial Measurment Unit*) seadmeid. GPS-üksus määrab õhusõiduki asukoha baasjaama suhtes ning IMU-üksus arvutab õhusõiduki orientatsiooni ruumis (piki- ja põikikalle, pöördenurk) ja kiirendusvektorit (joonis 5). Seega lihtsustatult võib öelda, et aerolaserskaneerimine (ALS)=LiDAR+GPS+IMU (Maastikuseire kava 2016).



**Joonis 5.** Aerolaserskaneerimise põhimõtteline skeem (Andersen *et al* 2006).

LiDAR-i sensori tööpõhimõte seisneb selles, et arvutatakse lennukilt saadetud valguskiire ja maapinnalt või mõnelt objektilt tagasipeegeldunud kiire vahelist aega. Kuna valguse kiirus on konstantne ( $3 \times 10^8$  m/s) ning LiDAR-i sensoriga on tuvastatud laserkiire levimise ajaline kestus, siis antud väärtusi omavahel korrutades leitakse kaugus objekti ja lennuki vahel. GPS

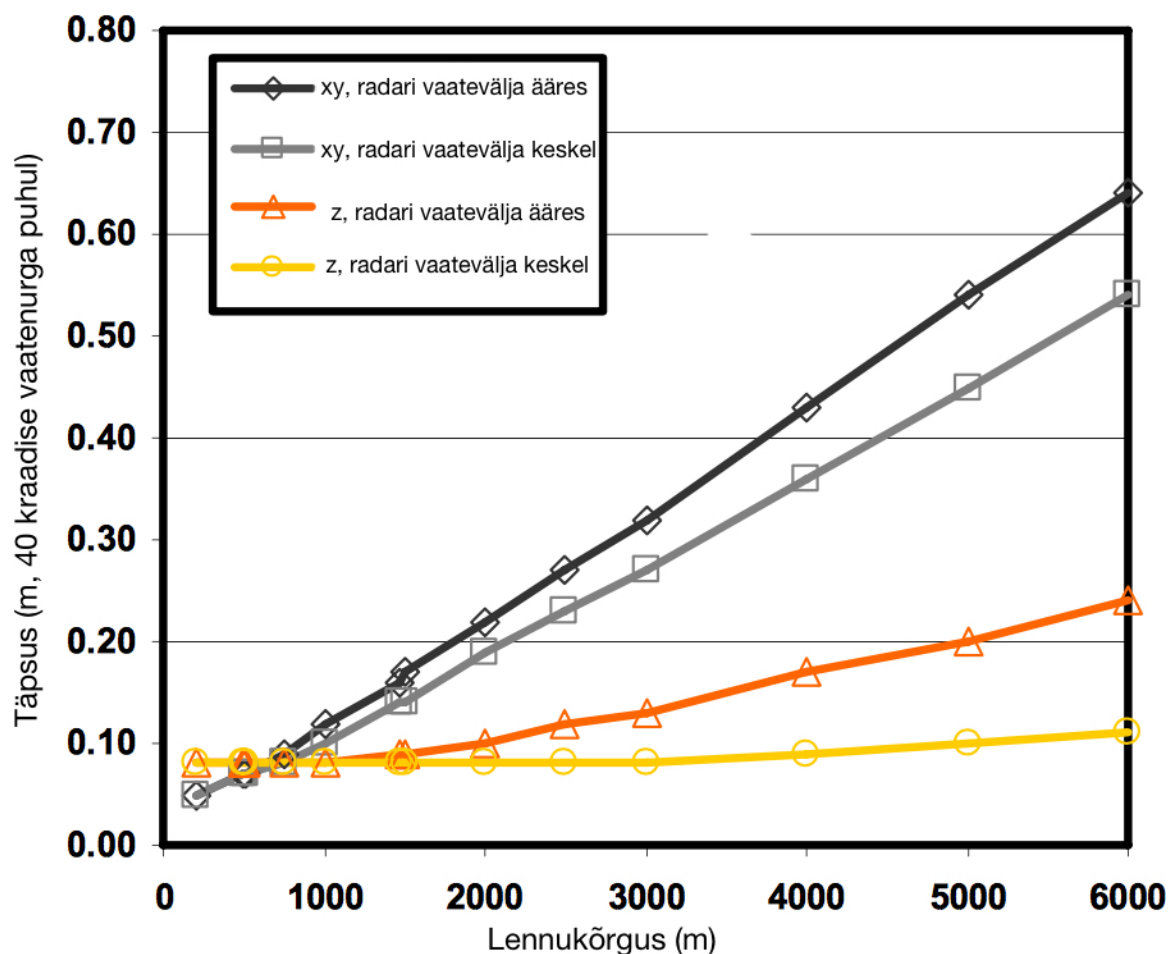
ja IMU seadmeid kasutades registreeritakse igal ajaühikul lennuki positsioon ruumis ning seeläbi saab igale laserkiirele määrata absoluutkõrguse. Seega koosneb iga laserkiire punkt kolmest mõõtmest:  $x$ ,  $y$  ja  $z$  (Andersen *et al* 2006). Lisaks koordinaatidele registreeritakse iga peegelduse korral selle intensiivsus ehk kui palju impulsi footonitest on tagasipeegeldusel hajunud (Metsur 2012).

LiDAR-i süsteemid töötavad infrapuna lainepikkuste vahemikus (800-1100 nm) ja olenevalt süsteemide eripärast saadavad välja 5000-100000 impulssi sekundis. Enamik LiDAR-i seadmeid suudavad salvestada kuni 5 peegeldust ühe impulsi kohta. Näiteks kui laserkiir tabab puud, siis tekib mitu peegeldust: puu ladvas, võrestikus ja lõpuks maapinnalt. Olenevalt lennuki kõrgusest võib ühe laserkiire punkti projektsioon maapinnal olla 0,1-1 m (Andersen *et al* 2006).

## **2.1. Aerolaserskaneerimise mõõdistustäpsus**

Aerolaserskaneerimise mõõdistustäpsus sõltub mitmest asjaolust, millest suurimad on viga kauguse mõõtmisel, laserkiire positsiooni ja suuna lugemisviga. Lisaks võib viga tulla ka andmete ülekandmisel mõnda koordinaatsüsteemi. Kuna kaugus, laserkiire positsioon ja suund mõõdetakse erinevate seadmetega, siis võib aja väikseimgi valesti registreerimine oluliselt mõjutada tulemuste õigsust (Baltsavias 1999).

Eestis teostab Maa-amet aerolaserskaneerimist Leica ALS50-II seadmega (Maa-amet 2017a). Tootja deklareerib oma seadme täpsuseks pärast järeltöötlust ja kuni 6000 m kõrguse puhul  $xy$ -teljel 7-64 cm ja  $z$ -teljel 8-24 cm (joonis 6). Mõõtetäpsus sõltub väga palju lennuki kõrgusest, see tähendab mida kõrgemal toimub mõõdistus, seda suurem veamäär tekib (Leica 2007). Suurt mõju kõrgusandmete täpsusele avaldab ka tihe alustaimestik. Seda sellepärast, et laserkiir ei suuda tungida läbi tiheda võsa, vaid peegeldub pealispinnalt tagasi. Euroopa metsade puhul on laserkiire läbitungimise võimeks hinnatud suvel 20-40% ja talvel 70%. Seega, mida kõrgem ja tihedam on võsa, seda kehvema maapinna kõrgusmodeli saab metsa seest. Sama seos kehtib ka tiheda heina puhul, kus laserkiir ei pruugi maapinnani jõuda (Vain 2008).

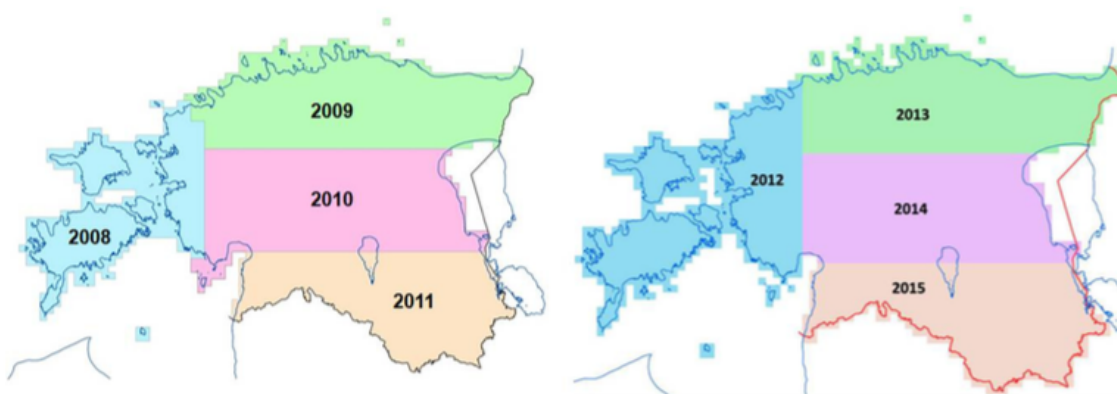


**Joonis 6.** LiDAR-i mõõdistuste täpsuste vahemik. Sisse on arvestatud ka nominaalne GPS viga 5 cm (Leica 2007).

Eesti kohal tehti kuni 2016. aastani ülelend 2400 meetri kõrguselt. Sellel ajal oli keskmine kõrguspunktide tihedus 0,45 punkti ruutmeetri kohta ( $p/m^2$ ) ja punkte, mis iseloomustavad maapinda 0,21  $p/m^2$ . Maksimaalne punktide omavaheline kaugus on kuni 2,6 m ning punkti arvutuslik kõrguse täpsus 0,07-0,12 m. Kontrollmõõtmistel on saadud vertikaalseks täpsuseks  $\pm 0,34$  m. 2400 m kõrguse lennu korral on laserpunkti läbimõõt maapinnal 54 cm ja keskmiselt jääb Eesti maismaa territooriumiga kattuvale ruutkilomeetrile 456 700 kõrguspunkti. 2016. aastast alates on seoses uue aerokaamera kasutuselevõttuga tõstetud lennukõrgust 3000 meetrini. Sellest tulenevalt on ka punkti tihedus langenud, mis nüüdsest on 0,15  $p/m^2$ . Tiheasustusega aladel toimuvad ülelennud 1300-1500 m kõrguselt ning seal on punktitiheus oluliselt suurem (Maa-amet 2017a).

## 2.2. Aerolaserskaneerimise kasutus Eestis

Aerolaserskaneerimist on Eestis korrapäraselt teostanud Maa-amet alates 2008. aastast. Selleks kasutatakse 2007. aastal soetatud lennukit Cessna Grand Caravan, mis on spetsiaalselt kohandatud lennuvahenditel kasutatavatele mõõteriistadele. Mõõdistushooaeg koos aerofotomõõdistamisega kestab aprilli lõpust kuni augusti keskpaigani, kuna sellel ajal on päikesenurk sobiv aerofotode tegemiseks. Ainult laserskaneerimist saab sobiva ilmaga teha aasta läbi, välja arvatud talvel kui lumi on maas (Gruno 2008). Lendude süstematiseerimiseks on Eesti territoorium jagatud neljaks osaks (joonis 7), millest igal aastal tehakse ära üks osa. ALS-i esimene mõõdistusring teostati aastatel 2008-2011 ja teine ring aastatel 2012-2015. Lendude tulemuseks on toorandmed ehk suur kogus LiDAR-i poolt salvestatud kõrguspunkte, millest umbes pool iseloomustavad maapinda ja ülejäänud kirjeldavad maapinnal olevaid objekte, nagu taimestik, hooned jms (Maa-amet 2017a).



**Joonis 7.** Aerolaserskaneerimise andmestik aastate lõikes kõrguselt 2400 m (Metsur 2012)

LiDAR-iga salvestatud andmed klassifitseeritakse automaatselt. See tähendab, et kõrguspunktile on antud väärtus, mis näitab, kas tegemist on maapinna või mõne muu nähtusega. Lennukõrgusega 2400 m jagatakse laserpunktid järgmiselt: (Maa-amet 2017a)

- klassifitseerimata punktid;
- maapinda iseloomustavad punktid;
- müra;
- maapinna hõrendatud punktid (kaugust >20 m või kõrgusvahemik +/- 0,3 m);
- suuremate veekogude pinnad;
- ehitised (ainult tiheasustusega alal);
- esimesed ja keskmised peegeldused, mis on valdavalt puistud.

Maa-amet loob LiDAR-i toorandmetest kõrgusmudeleid, mida tehakse nii maapinna kui ka ainult taimkatte kõrguse iseloomustamise kohta. Maapinna kõrgusmudel (*DEM- Digital Elevation Model*) on võrgustik-tüüpi (*GRID*), mille puhul tekitatakse algandmete interpoleerimise teel kõrguspunktid regulaarse sammuga, mistõttu nimetatakse seda kõrgusrastriks. Igale pikslile sellel kõrgusmudelil on ümberkaudsete andmete alusel interpoleeritud kõrgusväärtus. Maapinna kõrgusmudelid luuakse kogu Eesti ulatuses 5, 10, 25, 50 ja 100 meetrise lahutusega (Maa-amet 2017b).

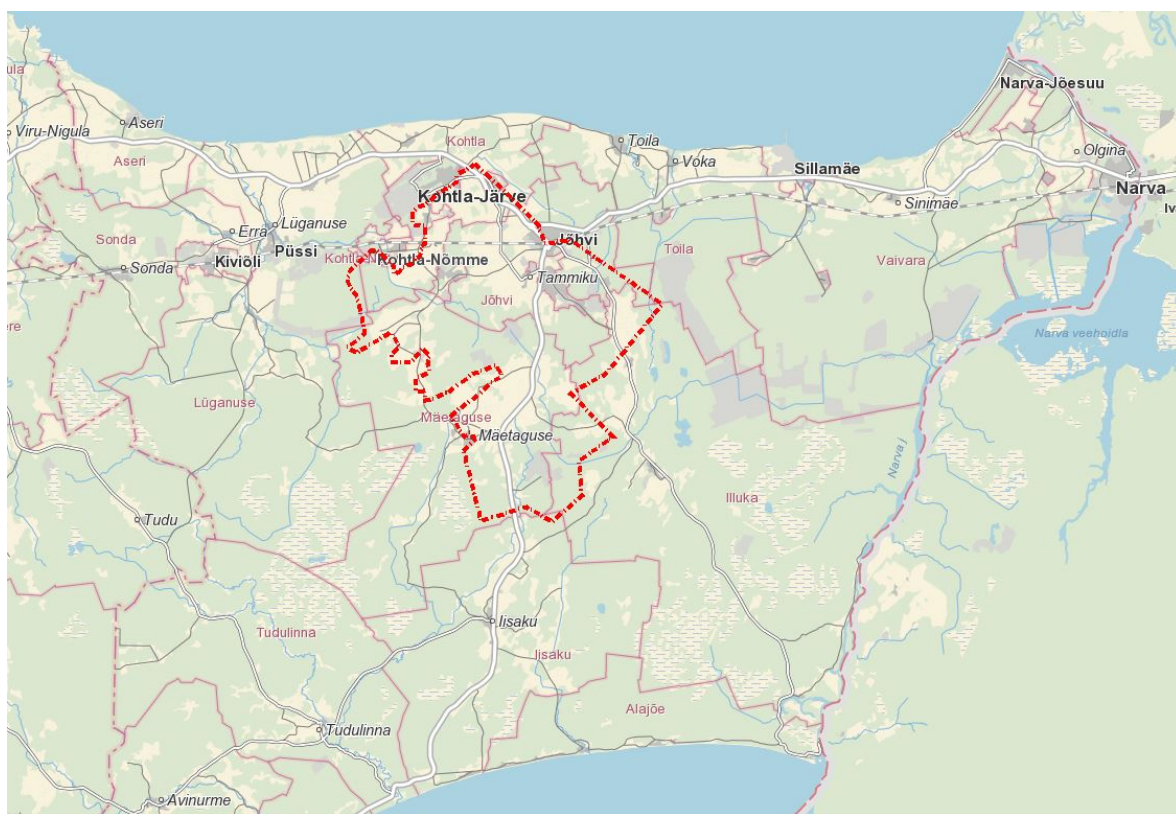
LiDAR-i andmeid on Eestis uurimistöodes kasutatud peamiselt metsanduses, kuna võimaldab määrata taimestiku kõrgust, läbipaistvust, lehepinnaindeksit ja mitmeid muid parameetreid (Vain 2011). Metsa kõrguse hindamiseks aerolidari mõõtmise põhjal on välja töötatud erinevad mudelid konkreetsele metsatüübile. Puistu takseeritud kõrguse määramist mõjutavad mitmed tegurid: metsa läbipaistvus, liigiline koosseis ja skaneerimise punktide tihedus. Üldiselt tekivad peegeldused võrastiku ülemiselt pinnalt, võrastikust seest ja maapinna lähedal. Peegelduste tekkimisel on oluline roll võrastiku läbipaistvusel, mis muutub vegetatsiooniperioodi käigus eriti lehtpuistudes. Kevadisel mõõtmisel tekivad peegeldused pigem maapinna lähedal, suvel aga peamiselt esimese rinde võrastikus. Suviste lidarmõõtmiste andmestikult on võimalik hinnata ka puistu elusvõrastiku ulatust, mille alusel saab infot puistu elujõulisuse, biomassi ja näiteks harvendusraie vajaduse kohta (Lang, Arumäe 2014).

LiDAR-i andmeid on kasutatud kultuurmaastike uurimisel Lahemaa ja Karula rahvuspargis. Antud uuringus kasutati Lahemaa rahvuspargis nii tavalennu (kõrgusel 2400 m) andmestikku kui ka eraldi tellitud madallennu (kõrgusel 1250 m) andmestikku. Andmeid kasutati, et analüüsida objekte, mis viitavad ajaloolistele maakasutusele reljeefis (kraavid, põllupeenrad, kalmed, kiviaiad ja –hunnikud ning muud korrapärased ilmingud maastikul). Madallennu puhul oli maapinda kirjeldavate punktide tihedus 10–15 korda suurem, võrreldes tavalennuga, mistõttu olid ka madallennu andmed oluliselt detailsemad maapinna reljeefi kirjeldamisel. Samas leiti, et metsaala kirjeldamiseks jääb punktitiheidusest väheseks, ilmselt metsaaluse reljeefi keerukuse ja erinevate objektide (kännud, mättad jms) defineerimise tõttu. Tavalennu andmed annavad hea ülevaate avatud maastiku reljeefist ja inimtekkelised reljeefimuutused (nt kraavid, teed jms) on hästi eristatavad. Metsaalal on tavalennu andmetes liialt vähe maapinda kirjeldavaid punkte ning seetõttu on ka tulemused oluliselt kehvemad võrreldes madallennuga (Meriste *et al* 2016).

Aerolaserskaneerimise andmetega on uuritud ka rannaprotsesside muutusi Pirita rannas. Uuringus vaadeldi umbes 250 m pikkust rannaala mitme aasta vältel ning võrreldi tulemusi TLS (terrestriline laserskanner) mõõdistusega. Uuringu tulemusel leiti, et ALS võimaldab võrdlemisi täpselt hinnata isegi väikseid muutuseid rannaribal. Küll aga leiti ka mõned ebatäpsused ALS-i kasutamisel. ALS-tehnoloogiaga mõõdetud profiilidel ei saa usaldada metsaservale lähemal kui 10 meetrit paiknevaid punkte, kuna need tulemused võivad sisaldada peegeldusi puuokstelt või alustaimestikult. Uuringus leiti, et laserskaneerimise kasutamine annab huvitavaid ja informatiivseid detaile lühikese aja jooksul toimunud rannikuprotsesside muutumise kohta (Eelsalu *et al* 2014).

### 3. Materjal ja metoodika

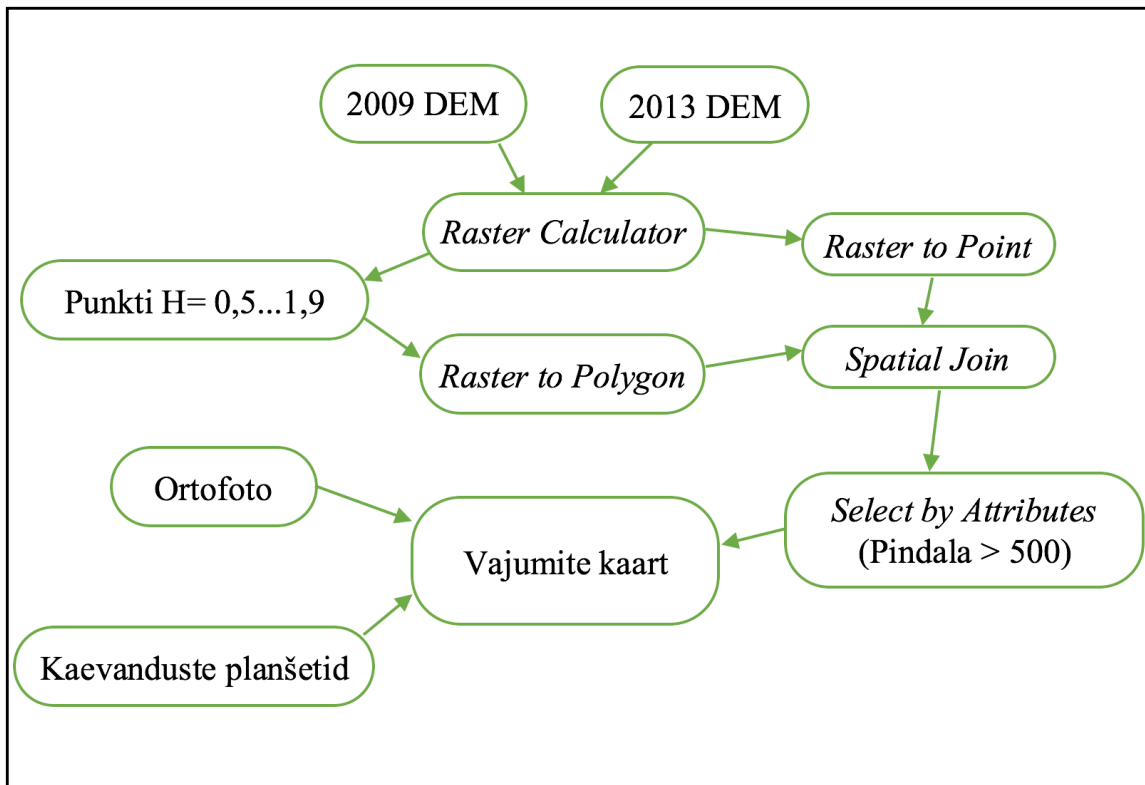
Käesoleva töö eesmärk on uurida põlevkivi allmaakaevanduste varingute avaldumist maapinna mikroreljeefis, kasutades selleks aerolaserskaneerimise andmeid. Kuna antud töö koostamise ajal on põlevkivikaevanduste piirkonnas Maa-amet läbi viinud kaks LiDAR-mõõdistamist (2009. ja 2013. aastal), siis antud tulemused kajastavad ainult nende nelja aasta jooksul toimunud maapinna reljeefi muutusi. Uurimispiirkonnas on järgnevad kaevandused: Kukruse, Kaevandust nr 2, Käva, Kaevandus nr 4, Kohtla, Sompä, Viru, Tammiku, Estonia ja Ahtme. Uuringuala pindala on ligikaudu 320 km<sup>2</sup> (joonis 8) , millest umbes pool asub metsaga kaetud aladel ja pool on avatud aladel (põllu-, tööstus- ning elamumaal).



**Joonis 8.** Uuringuala piir (aluskaart: Maa-amet 2017c).



Maapinna vajumite hindamiseks telliti Maa-ametilt aastate 2009 ja 2013 LiDAR-i andmete alusel koostatud kõrgusmudelid (DEM) piksli suurusega 5x5 meetrit ning failiformaadis 32-bit GeoTIFF. Andmed saadeti Maa-ametist kaardilehtede kaupa ning andmete töötluks kasutati ArcMap 10.5 tarkvara (joonis 9).



**Joonis 9.** Maapinna vajumite arvutamise meetoodika. Kaldkirjas on toodud ArcMap-i tööriistade nimed.

Maapinna vajumite leidmiseks lahutati 2009. aasta kõrgusmudelist 2013. aasta kõrgusmudel, kasutades selleks *ArcMap*-is tööriista *Raster Calculator*. Kõrgusmudel on sisuliselt kõrgusraster, kus igale pikslile on omistatud Maa-ameti poolt interpoleeritud kõrgusmärk. Lahutades üksteisest erinevate aastate rasterkaardid, on tulemuseks uus kaart, mis kajastab ainult kõrguse muutusi. Antud töö konteksti mitte sobivate kõrguse muutuste likvideerimiseks kasutati uuesti *Raster Calculator* tööriista, peale mida jäävad alles punktid, mille kõrguse muutus on suurem kui 0,5 meetrit ja väiksem kui 1,9 meetrit. Nimetatud väärtused on seatud põhjusel, et maapinna kõrguse muutused, mis on väiksemad kui 0,5 meetrit on suure tõenäosusega maapinnamudeli interpoleerimise viga, LiDAR-möödistamise viga või on erinevatel aastatel LiDAR-i punkt tabanud maapinnal erinevaid kohti. Suuremad muutused kui 1,9 meetrit samuti ei väljenda põlevkivi altkaevandatud tehnoloogiate tõttu maapinna vajumeid. Kirjanduse põhjal (Toomik 1999) on erinevate



kaevandustehnoloogiate puhul võimalikud maapinna vajumid 0,6-1,7 m. Näiteks 2008. aastal tuvastati Estonia kaevanduses 2 varingut, mille maapinna vajumid olid kuni 1,5 m (Soosalu 2009). Sellest tulenevalt on maapinna kõrguse muutused, mis on suuremad kui 1,9 meetrit, tingitud kas ehitustegevust või maapinnamudelis olevast veast.

Selleks, et vähendada punktide suurt hulka, mis peamiselt koosnevad üksikutest pikslitest (looduses 5x5 meetrine ala), võeti edasises analüüsis minimaalseks pindalaks 500 m<sup>2</sup>. Selleks kasutati *Raster to Polygon* tööriista. Selle *ArcMap*-i tööriista põhimõte seisneb selles, et see joonistab kõigile rasterpunktidele joone ümber. Need punktid, mis on kõrvuti, võtab ühe alana arvesse. Tulemuseks saadi kaardikiht, kus kõigile punktidele on omistatud pindalaline väärtus. Pärast seda oli võimalik eemaldada kõik alad, mille pindala on väiksem kui 500 m<sup>2</sup>, kasutades selleks *Select by Attributes* käsklust.

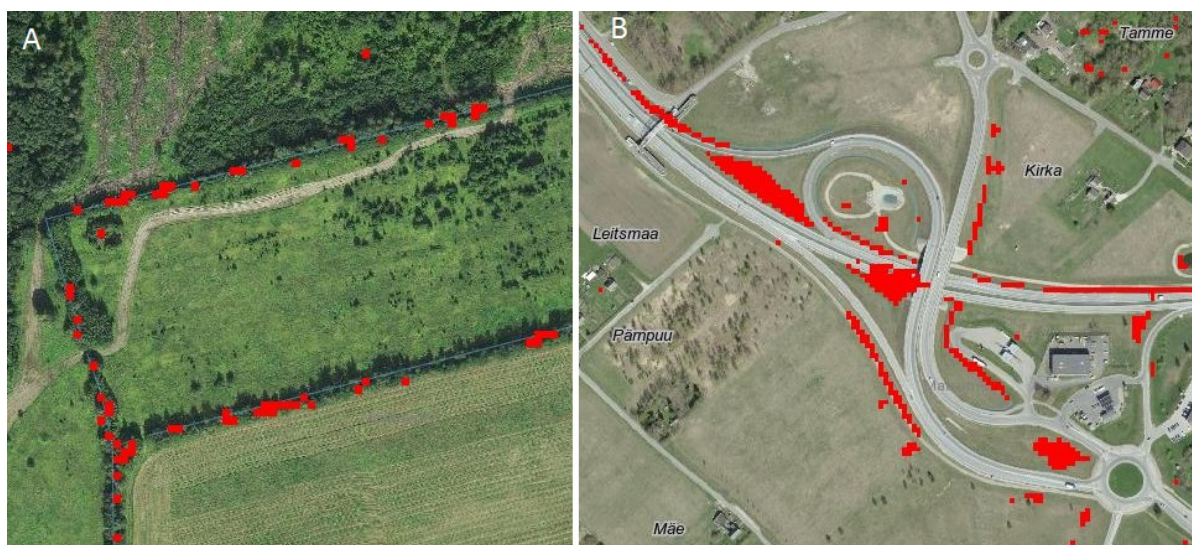
Valitud alade iseloomustamisel arvutati igale alale ka keskmine maapinna muutuse kõrgus. Selleks kasutati *Raster to Point* ja *Spatial Join* tööriistu. *Raster to Point* konverteerib rasteri punktiks, andes sellele rasteri kõrgusmärgi. *Spatial Join* tööriist arvutab kõikide ala sees asuvatele punktide keskmised kõrgused ning lisab need olemasolevate alade andmetabelisse. Seega arvutuste tulemuseks on kaardikiht, kus on toodud alad, mille pindala ja kõrguse muutus jäävad eelpool toodud piiridesse.

## 4. Tulemused ja arutelu

### 4.1. Maapinna vajumite määratlemine

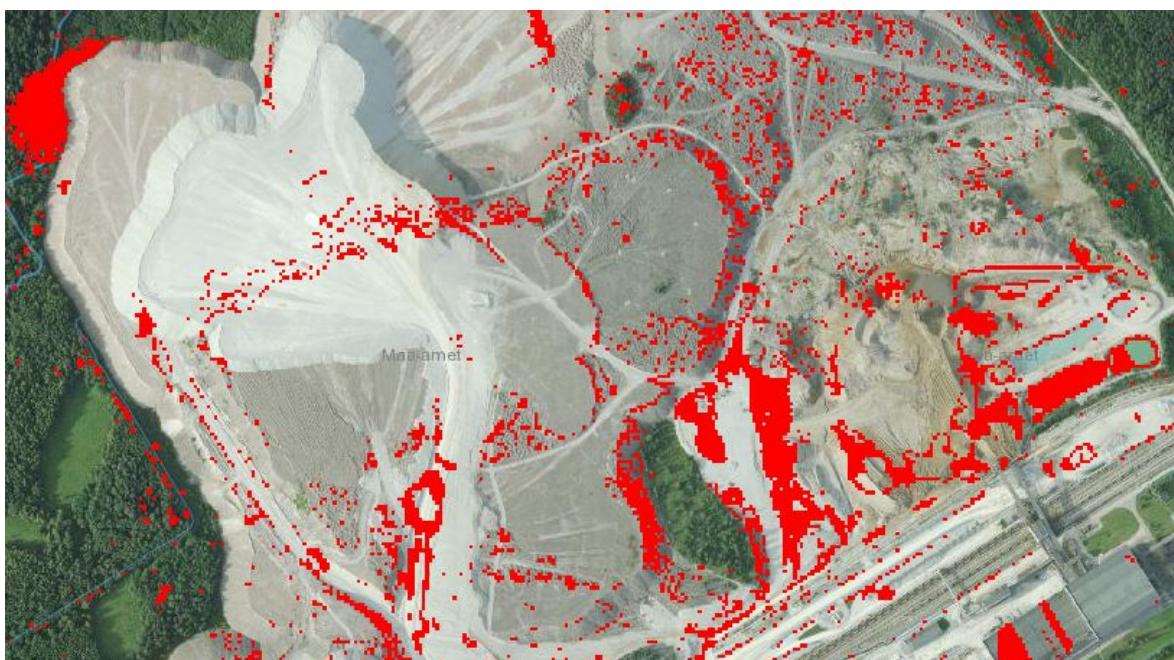
Metoodika arvutusmodeli järgi saadud maapinna kõrguste muutustest ei ole kõigil seost kaevandusvaringutega. Kuna maapinnamudelid koostatakse automaatsete LiDAR-i punktide määramise teel, siis tekib mudelisse ka vigu. Vigade eemaldamiseks on allpool toodud metoodika edasiarendus määramaks kaevanduste tõttu tekkinud maapinna vajumeid.

Maapinnamudelite analüüsi tulemusena tekkis ligikaudu 120 ala, mille pindala suurus (ala on suurem kui 500m<sup>2</sup>) ja kõrguste muutused (0,5-1,9 meetrit) jäid metoodikas toodud raamidesse. Selleks, et aru saada, millised neist punktidest võiks näidata kaevandusvaringuid võrreldakse kõiki alasi ortofotodega. Ortofotod laeti *ArcMap*-i kasutades Maa-ameti WMS-teenust. Tuvastamaks maapinna inimtekkelisi muutusi (peamiselt ehitustööd) ja looduslike eripärasid kasutati 2009. aasta ja 2013. aasta ortofotosi. Seejärel kõrvaldatakse punktid, mille seotus kaevandusvaringutega on ebatõenäoline. Näiteks, kui on näha, et leitud alad asuvad pikki kraavi, veekogu, sõiduteed vms (joonis 10). Põhjus seisneb selles, et LiDAR-i punktid langevad ülendlennu ajal erinevatesse kohtadesse, mistõttu ka interpoleeritud kõrgusmärgid on erinevad. Sõiduteede ääres asuvad kõrguse muutused on tekkinud üldjuhul sellepärast, et vaadeldaval ajaperioodil on olnud teetöid.



**Joonis 10.** Maapinna kõrguse muutused pikki kraavi (A) ja pikki sõiduteed (B).

Eemaldamisele kuuluvad ka punktid, mis asuvad tööstus- ja asulapiirkondades. Peamiselt mäendusega seotud tööstuspiirkondades on palju tehislikke maapinna muutusi (joonis 11). Näiteks puistangute rajamine, teisaldamine jms. Seega ei näita need maapinna tegelikke muutusi. Asulate sees oli üle 500 ruutmeetriste punktialasi väga vähe. Mõned üksikud alad, mis paiknesid asustatud piirkonnas olid seotud peamiselt ehitustegevusega. Hooned ja rajatised klassifitseeritakse Maa-ameti poolt automaatselt eraldi gruppi ja need antud analüüsis ei olnud kajastatud.



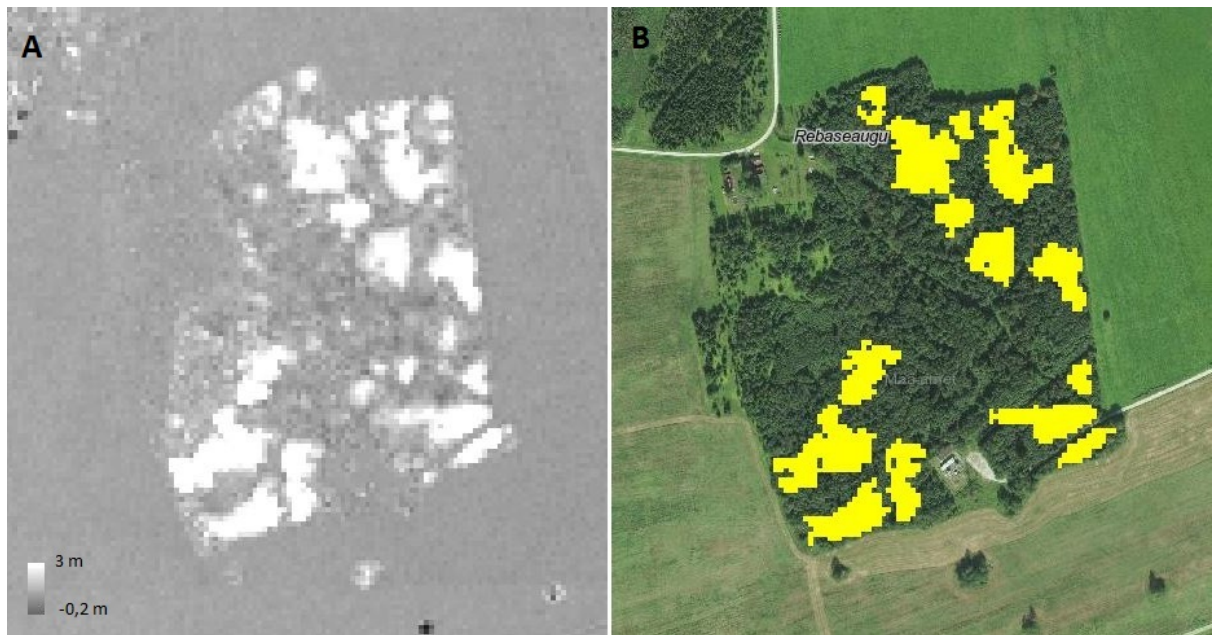
**Joonis 11.** Tööstuspiirkonna kõrguspunktid (punases), mis kuuluvad eemaldamisele.

Kõige keerulisemaks kujunes punktialade hindamine metsaga kaetud aladel. Kui põllualadel on punktide kõrguse muutused üsna stabiilsed ja ühtlased, siis metsamaal on need muutused järsud ja korrapäratud. See tuleneb sellest, et automaatse klassifitseerimise käigus võivad sisse tulla vead, mis määravad kas punkt liigitatakse maapinna või taimkatte klassi. Näiteks võib laserkiir tagasi peegelduda alustaimestikult või mõne puu alumiselt oksalt ning see klassifitseeritakse kui maapinna punkt. Kuna aga umbes pool antud töö uuringualast asub metsamaal, siis ei saa ka kogu metsamaad analüüsist välja jätta. Seetõttu loodi ühised kriteeriumid, mille järgi kõrguse muutuse punkte võrdsetel alustel hinnata.

Kui tegu on põllumaal asuva väiksema metsatukaga ja maapinna vajumi punktid langevad täpselt metsapiiri sisse ning punktialasid on tihedalt koos, siis need punktid eemaldatakse. Sellisel juhul on tõenäoliselt tegu on klassifitseerimise veaga. Joonisel 12 on toodud Estonia



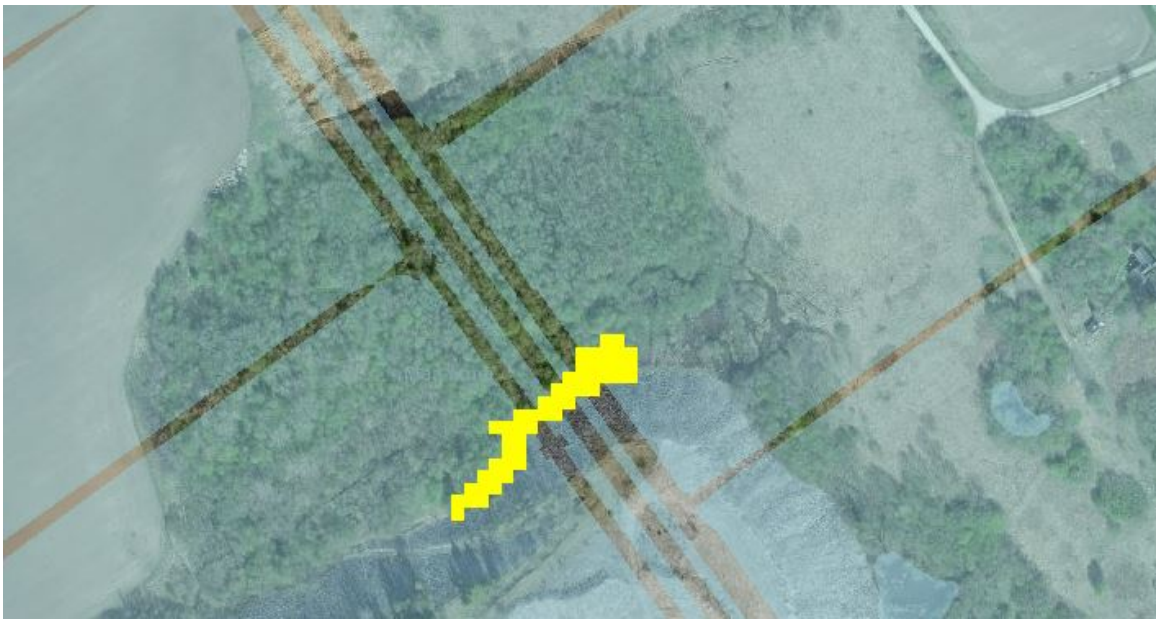
kaevanduse peal asuva metsatukk, kus on näha, et maapinna kõrgus võrreldes 2009. ja 2013 aasta maapinnamudeli järgi muutub ainult metsaga kaetud ala sees. Joonisel 12A on kujutatud kõrgusmudel, kus on näidatud maapinna kõrguse muutus ja joonisel 12B on kujutatud sama ala, kus alusena on kasutatud Maa-ameti ortofotot ja kollasena on näidatud alad, mis on vähemalt 500 m<sup>2</sup> suured. Kõik punktid, mis sarnanevad toodud näitega eemaldatakse ning ei arvestata kui võimalikku kaevandusvaringut.



**Joonis 12.** Maapinnamudeli kõrguse muutumine ainult metsatuka piires. Parempoolne on Maa-ameti DEM-mudel ja vasakpoolne on Maa-ameti ortofoto koos kõrguse muutuste punktidega.

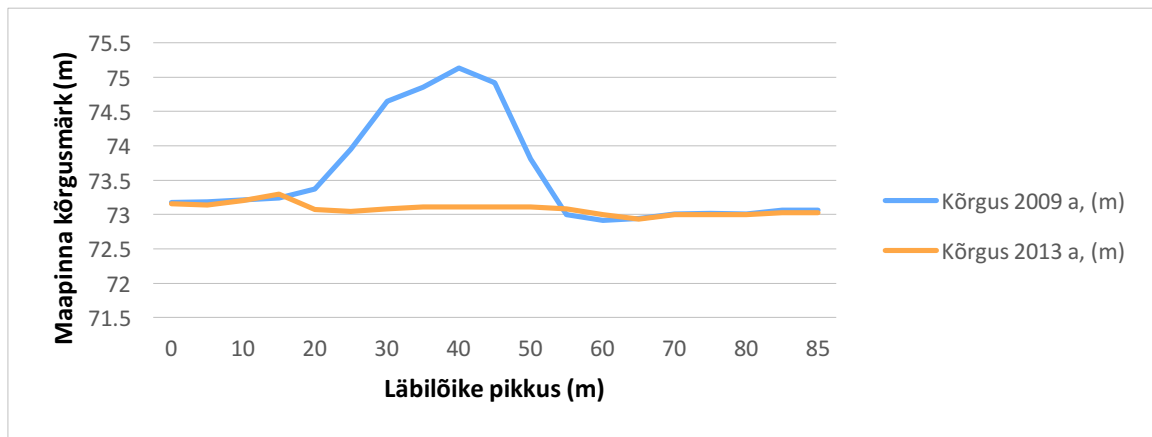
Eemaldatakse ka punktid, mis ei jää kaevandatud ala piiridesse. Alusandmetena kasutatakse TTÜ Mäeinstituudi poolt digitaliseeritud mäetööde planšette. Nimetatud alusandmed ei sisalda kõige uuemaid kaevandatud alasid, kuid need andmed aitavad oluliselt vähendada ekslike alade määramisest.

Kui eelnevad korrektuurid on tehtud, siis vaadatakse iga alles jäänud punkt omakorda üle ja hinnatakse selle paiknemise ning kuju seoseid. Kui punktid paiknevad ebaloomulikult ning kõrguse muutused on järsud, siis võib, et tegemine on kõrgusmudelisse oleva veaga. Näitena on toodud joonisel 13 Tammiku põlevkivikaevanduse ala, kus on toodud analüüsi tulemusel sobiva pindala ja kõrguse vahemikuga ala. Antud ala ei kvalifitseeru võimaliku kaevandusvaringu alla oma pikliku kuju ning liiga suurte kõrguse muutusega väiksel alal (vahemikus 0,5 ja 2,8 meetrit). Samuti kulgevad punktid üle strekkide ning asuvad ka paralleelselt puistanguga.



**Joonis 13.** Pikliku kujuga punktikogum (kollane), kus kõrguse muutused on järsud. Helesinine on Tammiku kaevanduse ala ning aluskaardina on kasutatud Maa-ameti ortofotot.

Analüüsi viimases staadiumis koostatakse allesjäänud aladele läbilõike profiilid, mille eesmärk on kindlaks teha alad, kus võib vajumi asemel tegu olla automaatse klassifitseerimise veaga. Selleks määratakse igale lõpliku valikusse jäänud alale läbilõike jooned. Joonte paiknemine valitakse selliselt, et see läbiks tervet vajumi ala ning kataks ka piisavalt ümbritsevat maapinda. Seejärel kasutatakse *ArcMap*-i tööriista *Stack Profile*, mis koostab igale joonele kõrguspunktid vastavalt maapinnamudeli rastri andmetele. Seda tehakse nii 2009. kui ka 2013. aasta andmete kohta. Tulemused saadakse tabeli kujul ning *Microsoft Excel* programmis koostatakse nende põhjal graafikud, mis annab võimaluse kõrvutada erinevate aastate kõrguste profiile (joonis 14).



**Joonis 14.** Analüüsi tulemusel leitud punktiala, mis ei näita kaevandusvaringut.

Joonisel 14 on toodud punktiala, mille eemaldamiseks metoodika kohaselt ei olnud põhjust. Kuid antud läbilõike profiili vaadates võib väita, et tegu on automaatse klassifitseerimise veaga. 2009. aastal on maapinna mudelis kujutatud antud ala kui kõrgendikku ning neli aastat hilisem mõõdistus on tuvastanud, et maapind on tasane. Seega antud näite põhjal saab väita, et 2009. aasta LiDAR-i punktid vaadeldaval alal ei kajasta mitte maapinda vaid tõenäoliselt on tegu taimeestiku kõrgusega.

## 4.2. Kaevandusvaringutest põhjustatud maapinna vajumid

Analüüsi tulemused on esitatud kaartidel, tabeli kujul ja profiili graafikutena. Iga kaevanduse kohta on loodud kaardid (lisad 8-17), kus peale märgitud analüüsi tulemusel kindlad maapinna vajumid (punased alad) ja ka kõik algsed punktid, mis kajastavad maapinnamudelite kohaselt kõrguse muutusi (kollases). Sinisega märgitud tähistavad alasi, mis algsete arvutuste kohaselt justkui näitavad maapinna vajumeid, kuid peale profiili graafiku koostamist selgus, et tegu on tõenäoliselt LiDAR-i andmete automaatse klassifitseerimise veaga. Kaartidel on toodud ka alade läbilõike jooned, mille alusel profiilid koostati.

Uuringuala analüüsi tulemusel leiti kokku 27 ala (tabel 1), millele koostati reljeefi profiil. Selle tulemusel tuvastati 7 maapinna vajumit, mis on seotud allmaakaevandamisega. Tabelis on toodud alade pindala, keskmine sügavus maapinnamudeli alusel ning autori hinnang vajumi olemasolule lähtudes läbilõike profiilist. Järgnevates alapeatükkides on iga kaevanduse kohta toodud ülevaade analüüsi tulemuste kohta.

**Tabel 1.** Maapinnamudelite analüüsimise tulemusel leitud alad.

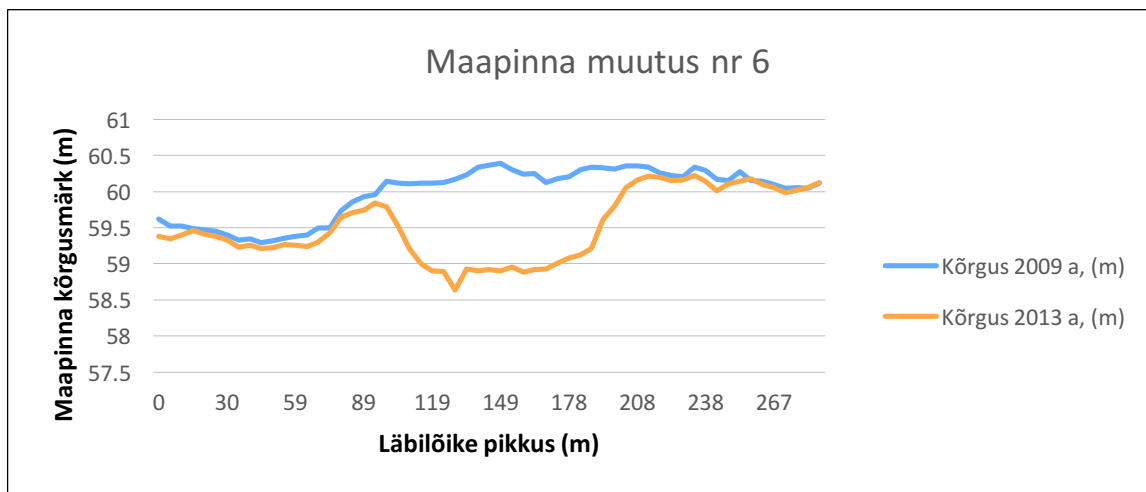
Ala nr	Kaevandus	Keskmine sügavus (m <sup>2</sup> )	Pindala (m <sup>2</sup> )	Varingu olemasolu analüüsi järgi	Profiil
1	Estonia	0,8	38100	Jah	Joonis 18
2	Estonia	0,7	39000	Jah	Joonis 19
3	Estonia	0,8	28150	Jah	Joonis 20
4	Estonia	0,8	18475	Jah	Joonis 21
5	Estonia	0,8	11200	Jah	Joonis 17
6	Estonia	1,0	42250	Jah	Joonis 15
7	Estonia	0,7	25175	Jah	Joonis 16
8	Estonia	0,9	800	Ei	Lisa 1
9	Estonia	1,0	925	Ei	Lisa 1
10	Estonia	1,1	900	Ei	Lisa 1
11	Estonia	1,0	550	Ei	Lisa 1
12	Estonia	0,9	750	Ei	Lisa 1
13	Estonia	1,0	1150	Ei	Lisa 1
14	Estonia	0,9	575	Ei	Lisa 1
15	Estonia	0,9	750	Ei	Lisa 1
16	Estonia	1,0	1600	Ei	Lisa 1
17	Sompa	0,9	575	Ei	Lisa 2
18	Tammiku	1,1	725	Ei	Lisa 3
19	Tammiku	1,1	2400	Ei	Lisa 3
20	Tammiku	0,9	875	Ei	Lisa 3
21	Kaevandus nr 2	1,1	600	Ei	Lisa 4
22	Kaevandus nr 2	0,9	950	Ei	Lisa 4
23	Kukruse	1,2	3775	Ei	Lisa 5
24	Kukruse	1,2	575	Ei	Lisa 5
25	Kukruse	0,6	525	Ei	Lisa 5
26	Käva	1,0	6700	Ei	Lisa 7
27	Kohtla	0,9	800	Ei	Lisa 6

#### 4.2.1. Estonia kaevandus

Estonia kaevandus alustas tööd 1972. aastal ja on kasutusel siiani. Kaevandus paikneb Jõhvist umbes 20 km kaugusel. Kaevandamistehnoloogiana on alguses peale kasutusel olnud ainult tulptervikutega kamberkaevandamine (Mikson *et al* 2008; Reinsalu 2011).

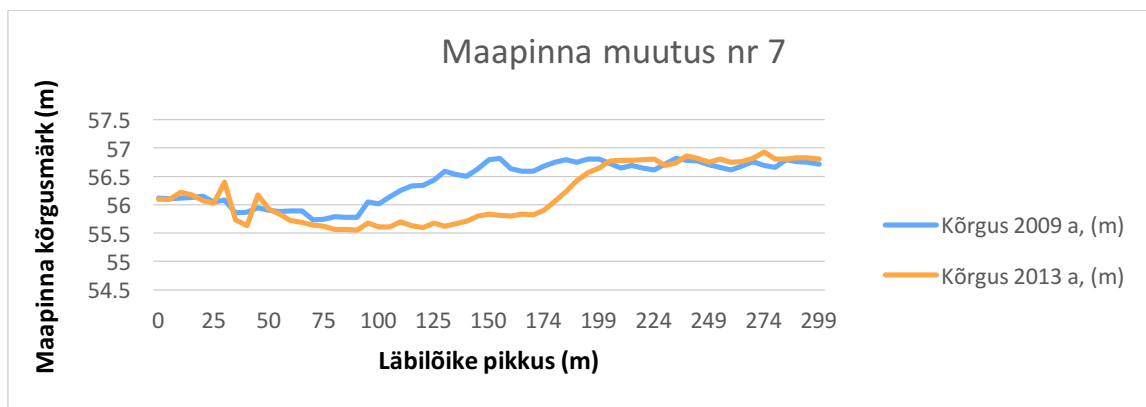
Analüüsi tulemusena leiti kaevanduse alt 7 varingut (nr 10, 11, 12, 14, 15, 16 ja 22). Maapinna vajumite asukohad on kajastatud lisas 8 toodud kaardil. Pindalalt on suurim vajumiala nr 6, mille pindala on 42 250 m<sup>2</sup>. Ala paikneb valdavalt metsaalal ning keskmine

vajumi sügavus on 1 meeter. Joonisel 15 on toodud ala profiil, mille abil leiab kinnitust, et tegu on maapinna vajumiga. Jooniselt on näha, et 2009. aasta mõõdistuse järgi oli ala valdavalt tasane ning 2013. aastal tekkis varingule omane “kausjas” kuju.



**Joonis 15.** Ala nr 6 profiil.

Ala nr 7 asub sarnaselt eelmisele valdavalt metsas ning selle pindala on 25 175 m<sup>2</sup> ja keskmine vajumi sügavus 0,7 meetrit. Joonisel 16 on toodud selle ala läbilõike profiil.

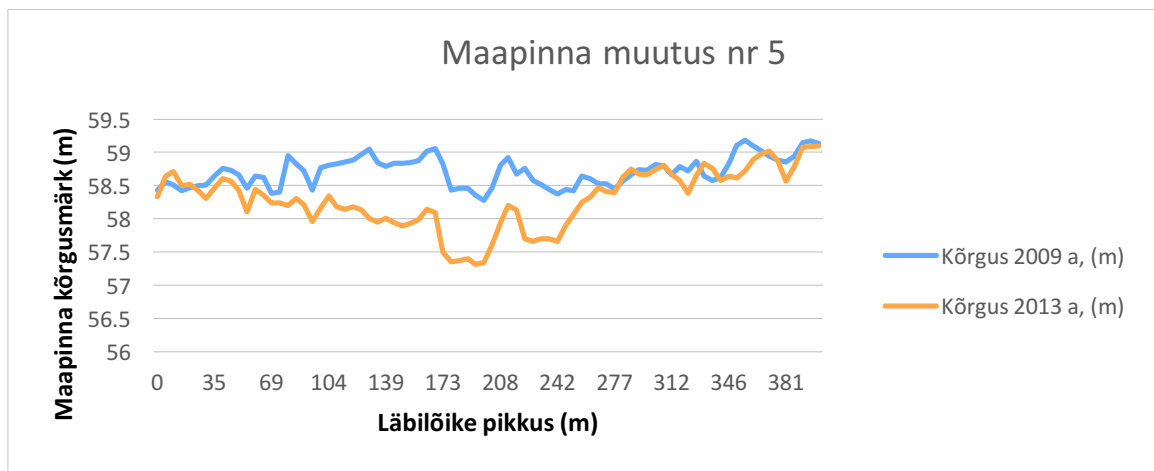


**Joonis 16.** Ala nr 7 profiil.

Samas piirkonnas, nagu eelmised kaks maapinna vajumit, asus ka ala nr 5, mille pindala on 11 200 m<sup>2</sup> ja keskmine vajumi sügavus 0,8 meetrit. Antud ala on huvitav, sest külgneb puistanguga ning esmase vaatluse järgi tundus, et tegu on LiDAR-mõõdistuse klassifitseerimisveaga. Kuna pindala on suur, siis loodi alast maapinna reljeefi profiil. Profiilil (joonis 17) on maapind üsna korrapäratu, kuid vajumi sügavus on sellel eristatav. Profiili läbilõike joon ei ole vajumiga risti vaid on diagonaalne, kuna asub puistanguga

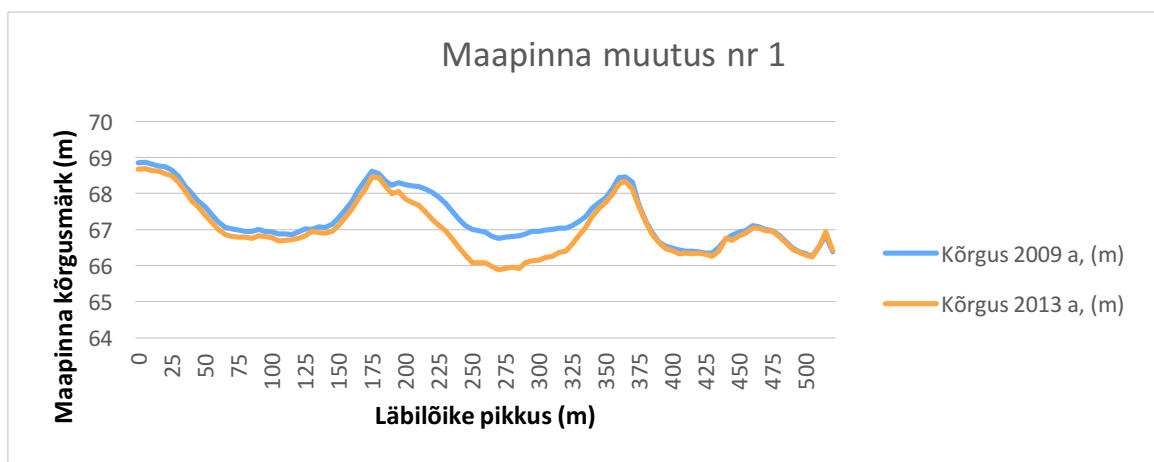


kõrval. Maapinnamudeli järgi on ka alust arvata, et vajunud on ka puistangu alune ala, seega on tõenäoliselt varing oluliselt suurem kui maapinnamudelis kajastatud.



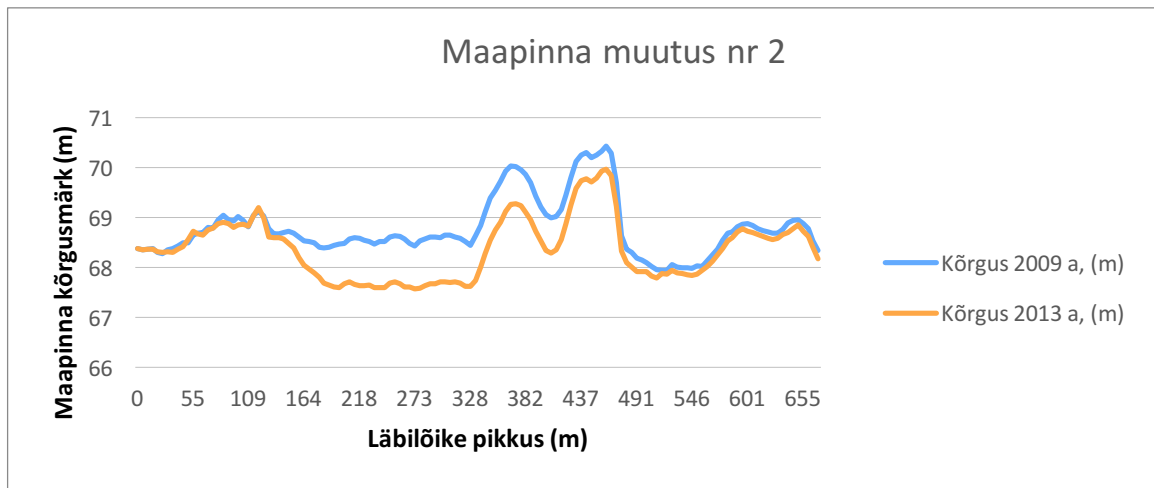
**Joonis 17.** Ala nr 5 profiil.

Ala nr 1 asub valdavalt põllumaal ning selle vajumi pindala on 38 100 m<sup>2</sup> ning keskmine sügavus 0,8 meetrit. Vajumi olemasolu kinnitab ka ala profiil (joonis 18), kus on näha, et maapind enne ja pärast vajumit on kahe ülelennu ajal peaaegu identne.



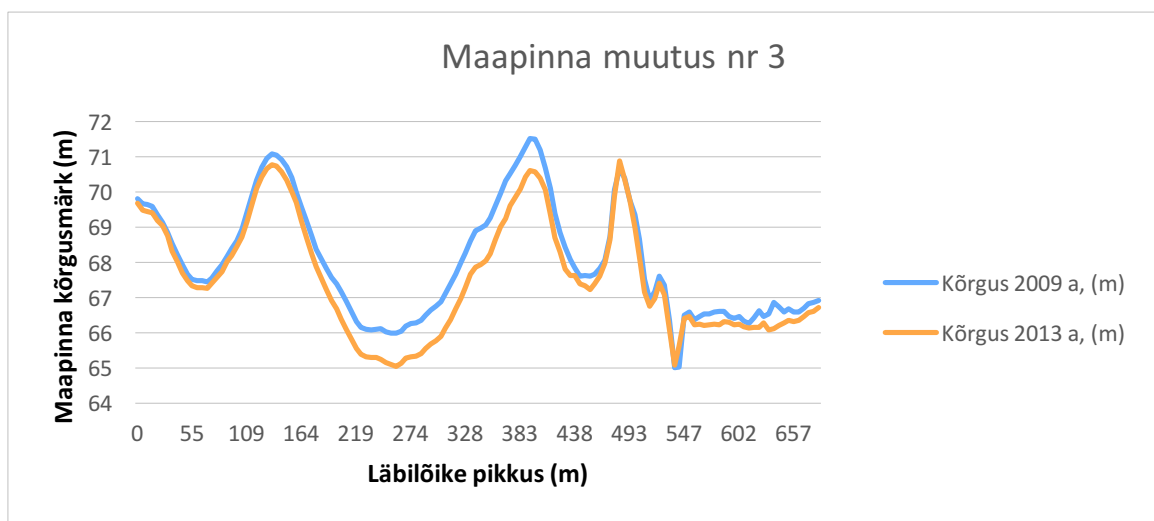
**Joonis 18.** Ala nr 1 profiil.

Ala nr 2 asub samuti avatud põllumaal ning selle pindala on 39 000 m<sup>2</sup> ja keskmine sügavus 0,7 meetrit. Vajumi olemasolu kinnitab ka ala profiil (joonis 19), kus on näha, et 2009. aastal oli maapind vajumi asukohas võrdlemisi tasane. Antud ala läbilõige on tehtud pikki vajumit, see tähendab, et kajastab vajumi pikemat osa.



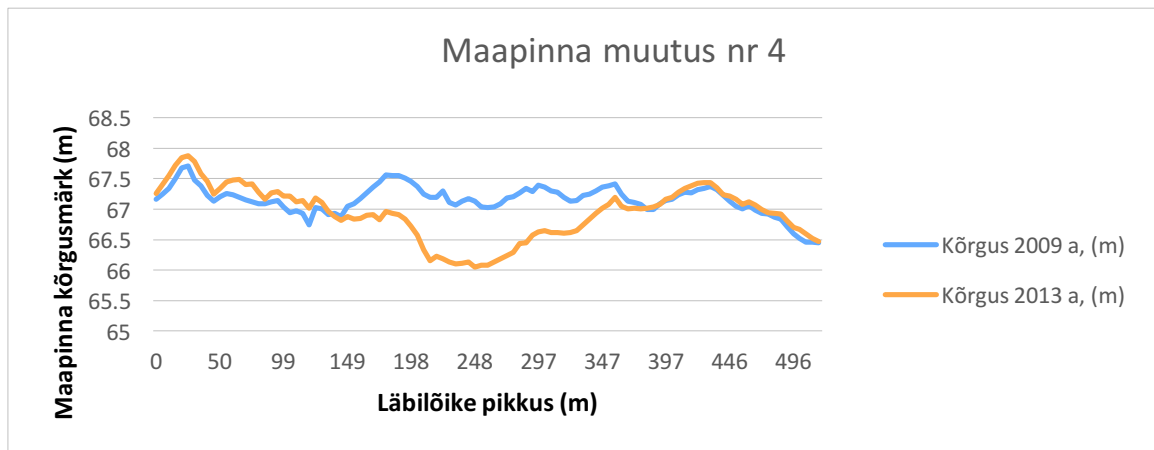
**Joonis 19.** Ala nr 2 profiil.

Vajumiala nr 3 asub avatud maastikul ning pindala on 28 150 m<sup>2</sup> ja keskmine sügavus 0,8 meetrit. Profiili jooniselt (joonis 20) on näha, et ala asub 5-6 meetri sügavuses orus ning kaevandusvaringule omast pinnavormi ei ole tekkinud. Küll aga viitab vajumile asjaolu, et 2009. ja 2013. aasta ülelennu kõrgusandmed kattuvad täielikult peaaegu terve läbilõike ulatuses, välja arvatud arvutatud vajumi piirkonnas.



**Joonis 20.** Ala nr 3 profiil.

Ala nr 4 asub avatud maastikul ning pindala on 18 475 m<sup>2</sup> ja keskmine sügavus 0,8 meetrit. Antud ala ei asu töös käsitletud kaevanduse planšetil, kuid tuginedes Estonia kaevanduse tööplaanile (Kaarlõp, Sokman 2017) ja vajumi ala suuruse ja iseloomule, siis võib kindlalt eeldada, et tegu on kaevandatud alaga. Vajumi olemasolu kinnitab ka profiil (joonis 21), kus on näha, et maapind vajumi ümber on samade kõrgusmärkidega nii 2009. kui ka 2013. aastal.



**Joonis 21.** Ala nr 4 profiil.

Estonia põlevkivikaevanduse alal on lisaks veel 9 punkti, mis küll maapinnamudeli järgi jäävad kõrguse muutuse piiridesse, kuid profiile (lisa 1) analüüsides need vajumiteks ei kvalifitseerunud. Nimetatud alad asuvad enamasti metsaalal, seega on tõenäoliselt tegu LiDAR-i punktide automaatse klassifitseerimise veaga.

#### 4.2.2. Sompa kaevandus

Kaevandus töötas aastatel 1948-1999. Algusaastatel kasutati paarislaavadega lankkaevandamist koos lae sujuva langetamisega täiteriitadele, mis olid laotud aherainest. Hiljem võeti kasutusel kombainkaevandamine. (Surva 2008).

Kaevandusalalt ei leidunud analüüsi tulemusel ühtegi varinguala, mis oleks tekkinud vaadeldaval ajaperioodil. Maa-ala sarnaneb Kohtla kaevandusalale: suur metsa osakaal ja vähe maapinna muutust kajastavaid punkte. Piirkonnas leidis üks ala (nr 17), mis meetoodika kriteeriumitele vastab, kuid selle profiili (lisa 2) analüüsides võib siiski eeldada, et tegu ei ole kaevandusvaringuga. Kaevandusala kaart, koos kõigi reljeefi kõrguste muutustega on toodud lisa 9.

#### 4.2.3. Tammiku kaevandus

Kaevandus töötas aastatel 1951-1999 (Küttis *et. al* 2008). Kaevandamistehnoloogiana oli kasutusel tulptervikutega kamberkaevandamine (Väizene 2015).

Kaevandusalalt ei leidunud analüüsi tulemusel ühtegi varinguala, mis on tekkinud vaadeldaval ajaperioodil. Piirkonnas oli maapinnamudeli järgi kolm võimalikku vajumiala (alade nr 18, 19, 20), kuid peale profiili graafiku (lisa 3) analüüsi need alad varinguks ei

klassifitseerunud. Alal leidsid mõned tihedamad punktikogumid metsaalal, kuid üldiselt oli ala ilma suuremateta kõrguse muutusteta. Kaevandusala kaart, koos kõigi reljeefi kõrguste muutustega on toodud lisas 10.

#### 4.2.4. Kaevandus nr 2

Kaevandus nr 2 alustas tööd 1949. aastal ja oli töös kuni 1973. aastani. Kaevanduses katsetati aastate jooksul mitmeid erinevaid tehnoloogiaid: kõrge laega väljamine, kamberkaevandamine ja käsilaavad (Tohver, Raag 2008). Valdavaks kaevandamis-tehnoloogiaks oli käsilaavaga kaevandamine (Väizene 2015).

Enamus kaevanduse alast asub põllumaadel ja kõrguse muutusi oli minimaalselt, kuid esines üks põllumaa osa (joonis 22), kus on tihedalt kõrguse muutusi (valdavalt 0,5 meetrised). Huvitavavaks teeb asjaolu, et punktid lõpevad ära täpselt kaardiruudustiku piirimail. Põhjus võib olla selles, et konkreetne ala on mõõdistatud ja pildistatud erinevatel päevadel. Ala, kus on palju punkte, on mõõdistatud 8. mail 2013 ja ala, kus punktid põllumaal järsku ära lõpevad, on mõõdistatud 14. mail (Maa-ameti geoportaal). Teisi taolisi anomaaliaid uuringualas ei olnud.



**Joonis 22.** Punktiala, mis on tekkinud erineval ajal mõõdistatud aladel.

Kaevandusalt ei leidunud analüüsi tulemusel ühtegi kindlat vajumiala, mis oleks tekkinud vaadeldaval ajaperioodil. Eelkõige ka sellepärast, et antud kaevanduses on lagi peale kaevandamist koheselt langetatud ning edasisi maapinna kõrguse muutusi ei tohiks seal esineda. Analüüsi tulemusel oli kaks ala (nr 21 ja nr 22), mis täitsid metoodika kriteeriume, kuid profiili graafikut (lisa 4) analüüsides need alad varinguks ei kvalifitseerunud. Kaevandusala kaart, koos kõigi reljeefi kõrguste muutustega on toodud lisa 11.

#### **4.2.5. Kukruse kaevandus**

Kaevandus asub Kohtla ja Jõhvi valla maadel ning on Eesti vanim allmaakaevandus. Kaevandamisega alustati 1916. aastal ning lõplikult suleti 1967. aastal, mille jooksul kaevandati ligikaudu 13 km<sup>2</sup> suuruselt alalt (Prima 2008).

Kaevandusalt ei leidunud analüüsi tulemusel ühtegi varinguala, mis oleks tekkinud vaadeldaval ajaperioodil. Antud ala oli võrdlemisi kõrguse muutusteta. Suuremad kõrguse muutuse alad jäid metsaaladele ja sõiduteede äärde. Metoodika kohaselt leiti kolm ala (nr 23, 24 ja 25), mis täitsid kõik metoodikas toodud kriteeriume, kuid profiili (lisa 5) analüüsides need varinguks ei kvalifitseerunud. Need alad olid võrdlemisi väikesed ja asuvad metsaga kaetud aladel, mistõttu on tõenäoline, et tegu on punktide klassifitseerimise veaga. Kaevandusala kaart, koos kõigi reljeefi kõrguste muutustega on toodud lisa 12.

#### **4.2.6. Kohtla kaevandus**

Kaevandus töötas aastatel 1937-1999 (Reinsalu 2011). Kaevandamistehnoloogiana oli kasutusel nii käsilaava kui ka kombainkaevandamine koos lae täieliku varistamisega. Viimane neist kattis ka valdava osa kaevanduse pindalast. (Kirstaja, Rannus 2008).

Kaevandusalt ei leidunud analüüsi tulemusel ühtegi varinguala, mis oleks tekkinud vaadeldaval ajaperioodil. Maapinnamudelite võrdlusel leiti üks vajumit kirjeldav ala (nr 27), kuid profiili (lisa 6) põhjal on tegu klassifitseerimise veaga. Kaevanduse maa-ala on valdavalt kaetud metsaga. Kõrguse muutuse punktid langesid peamiselt teede ja kraavide kohale. Kaevandusala kaart, koos kõigi reljeefi kõrguste muutustega on toodud lisa 13.

#### **4.2.7. Käva kaevandus**

Kaevandus töötas aastatel 1924-1972. Algusaastatel kasutati kambertervikkaevandamist ning hiljem võeti kasutusele paarislaavadega lankkaevandamine (Järvet, Laos 2008).

Kaevandusalt ei leidunud analüüsi tulemusel ühtegi varinguala, mis oleks tekkinud vaadeldaval ajaperioodil. Enamik kõrguse muutuse punkte asusid metsamaal, seega võib neid lugeda klassifitseerimisvea alla. Alal leidis üks suurem ala (nr 26), kuid peale profiiligraafiku (lisa 7) analüüsi võib järeldada, et tegu ei ole kaevandusvaringuga. Kaevandusale jääb ka üks metsamaa (joonis 23), kus on väga palju üksikuid punkte ja väiksemaid alasid. Edasises analüüsis need küll ei osalenud, kuid huvitavaks teeb asjaolu, et üheski teises piirkonnas sellist tihedat kõrguse muutuse punkte ei esinenud. Kindlat põhjust ei tuvastatud, kuid võimalik, et tegu on taimestiku eripäraga. Kaevandusala kaart, koos kõigi reljeeffi kõrguste muutustega on toodud lisa 14.



**Joonis 23.** Ainus metsamaa uuringualal, kus on väga tihedalt kõrguse muutust näitavaid punkte.

#### **4.2.8. Ahtme kaevandus**

Kaevandus töötas aastatel 1948-2001 (Nikolai 2008). Kaevandamistehnoloogiana oli kasutusel tulptervikutega kamberkaevandamine ja käsilaava (Väizene 2015).

Kaevandusalt ei leidunud analüüsi tulemusel ühtegi varinguala, mis on tekkinud vaadeldaval ajaperioodil. Piirkonnas puudusid ka kahtlust tekitavad punktid, seega ka profiiligraafikud puuduvad. Alal olid suuremad kõrguse muutused tööstusmaastikel, mis said metoodika kohaselt ka analüüsist eemaldatud. Maa-ameti ortofoto järgi on enamus kaevandusalast metsaga kaetud, kuid ka seal ei olnud üksikute kõrguse muutuse punktide arv eriti suur. Kaevandusala kaart, koos kõigi reljeeffi kõrguste muutustega on toodud lisa 15.



#### **4.2.9. Viru kaevandus**

Kaevandus töötas aastatel 1964-2013 (Prima, Hiiekivi 2008). Kaevandamistehnoloogiana kasutati tulptervikutega kamberkaevandamist (Väizene 2015).

Kaevandusalt ei leidunud analüüsi tulemusel ühtegi varinguala, mis on tekkinud vaadeldaval ajaperioodil. Piirkonnas ei olnud ka ühtegi ala, mis oleks olnud sobilik profiili graafiku loomiseks. Piirkond on valdavalt metsaga kaetud ning enamus üksikuid punkte asus kraavide juures ja mäetööstusmaal. Kaevandusala kaart, koos kõigi reljeefi kõrguste muutustega on toodud lisas 16.

#### **4.2.10. Kaevandus nr 4**

Kaevandus töötas aastail 1953-1975 ja asub Kohtla-Järve linnast umbes 5 km kaugusel. Peamiseks kaevandamisviisiks oli projekteeritud paarislaavadega lankkaevandamine. Kasutusel oli ka mitmeid erinevaid maavara väljamise tehnoloogiaid: käsilaava (väljatavava kihi paksus 2,1-2,25 m), kamberkaevandamine (kihi paksus 3,2 m) ja kombainlaava, koos laekivimite täieliku langetamisega (kihi paksus 1,5-1,6 m) (Kaup, Nugis 2008).

Kaevandusalt ei leidunud analüüsi tulemusel ühtegi varinguala, mis oleks tekkinud vaadeldaval ajaperioodil. Kaevandus paikneb valdavalt põllumaadel, kus kõrguse muutusi oli vähe ja needki olid enamuses üksikud punktid. Suuremad alad (> 500 m<sup>2</sup>), asusid kõik tööstusalal, seega ei ole antud alal ühegi punkti kohta ka profiiligraafikut tehtud. Kaevandusala kaart, koos kõigi reljeefi kõrguste muutustega on toodud lisas 17.

### **4.3. Kohapealne vaatlus**

Kontrollimaks töös leitud maapinna vajumeid, külastati 1. mail Ida-Virumaad. Vaatluse alla kuulusid kuus ala (nr 1, 2, 3, 4, 6 ja 7), mis analüüsi kohaselt on kindlalt vajumid. Lisaks vaadeldi nelja ala (nr, 10, 14, 19 ja 20), mis profiilide kohaselt on tekkinud klassifitseerimise vea tõttu. Alad nr 19 ja 20 asuvad Tammiku kaevanduse alal ja kõik ülejäänud asuvad Estonia kaevanduse alal. Välitöö piirdus punktide lühiajalise vaatlusega ilma mõõtevahenditeta, seega lõplike järeldusi antud vaatlusest teha ei saa.

Vaatluse tulemusel selgus, et vajumialad ei ole visuaalselt selgelt eristatavad. Puudusid selged vajumi piirid nagu eespool toodud joonisel 4, kus maapinna vajum oli tekitatud sihiliku lae varistamisega peale maavara väljamist. Näiteks punkt nr 2 asub põllumaal, kuid

kuna piirkonna pinnavorm oli lainjas, siis oli keeruline ilma jooniseta täpselt selgeks teha, kust vajumi piir algab. Vajumi ala on aimatav, kuid ei ole selgelt piiritletav.

Ala nr 3 asub orus, mida kajastab ka selle profiil (joonis 20). Oru sügavus on umbes 5-6 meetrit. Ka seal oli vajumi koht ainult aimatav, kuna ümbritsev maapind oli samuti lainjas. Kohaliku elanik, kes elab vajumist umbes 100 meetri kaugusel, ei ole antud varingut täheldanud. Kuna aga arvutuslikult on ala suurus umbes 130x250 m ja keskmine vajumi sügavus 0,8 m ning lisaks asub orus, siis võibki see kohalikele jääda märkamatuks. Seda ka põhjusel, et vajumi ääred on väga lauged.

Ala nr 4 asub põllumaal ning selle vajumi piirid maapinnal olid võrdlemisi selged. Punktid nr 6 ja 7 asusid metsamaal. Alal nr 6 oli vajumipiiri astang rohkem eristatav, kuid üldiselt olid need siiski raskelt piiritletavad maapinna muutlikuse tõttu. Punkti nr 6 läbib kraav ning 2013 aasta ortofotol on näha, et vajumi alal kraavi ümbrusesse on tekkinud suurem veekogu. Seda tõenäoliselt sellepärast, et antud kohas on kraav vajumi tõttu madalam ja vesi ajab suurvee ajal üle kraaviääre.

Ala nr 1 asub enamjaolt põllumaal. Antud alal on kohapeal näha selgelt madalam koht, kuid ka profiililt (joonis 18) tuleb välja, et kogu piirkonna maapind on pisut lainjas, mistõttu oli ka kohapeal keeruline täpselt vajumit piiritleda. Antud vajum asus elumajadest vähem kui 100 m kaugusel.

Ülejäänud aladest (nr 10, 14, 19 ja 20), mis analüüsi tulemusel ja maapinna profiilide võrdlusel ei kvalifitseerunud kui maapinna vajum, ei leitud ka vaatluse käigus mingeid ilminguid maapinna vajumi olemasoluks. Kõik need alad olid võrreldes leitud vajumitega oluliselt väiksemad, pindalad jäi alla 3000 m<sup>2</sup>. Antud alad asusid metsaaladel ning vaatluse käigus oli ka näha langenud puid ning madalaid põõsaid, mis võisid maapinnamudelil valeinfot sisendada.

Kokkuvõtvalt võib öelda, et LiDAR-i andmestiku põhjal saab maapinna vajumeid piiritleda oluliselt täpsemalt kui kohapealse vaatlusega. Mitmed varingud oleks jäänud ainult ortofoto ja välitööde vaatluse käigus avastamata. Kuigi vaatluse käigus ei täheldatud märkimisväärseid keskkonnamõjusi vajumi aladel, on saadud teave siiski kasulik allmaakaevanduste maapinna muutuste jälgimiseks ja kaardistamiseks.



## Kokkuvõte

Töö eesmärk oli aerolaserskaneerimise ehk LiDAR-i andmestikust luua metoodika, mille alusel tuvastada kaevandusvaringute mõjul tekkinud maapinnavajumeid. Lisaks leida maapinna vajumid, mis on tekkinud vahemikus 2009-2013 a. Selleks kasutati Maa-ameti poolt koostatud 2009. ja 2013. aasta maapinnamudeleid täpsusega 5x5 meetrit. Nende andmete omavahelisel võrdluses leiti maapinna reljeefi muutused, mis on tingitud põlevkivi kaevandamisest.

Töös leiti sobilik metoodika kaevandusvaringute mõjul tekkinud maapinna vajumite tuvastamiseks. Metoodika koosneb kahest osast, millest esimene osa sisaldab maapinnamudelite analüüsi ja teine osa leitud aladele reljeefi profiilide koostamist. Profiilide koostamine aitab oluliselt vähendada maapinnamudelis olevaid LiDAR-i punktide klassifitseerimise vigu.

Analüüsi tulemusel leiti uuringualalt 7 maapinna vajumit, mis seotud põlevkivi kaevandamisega. Vajumite pindalad on vahemikus 12 000-42 000 m<sup>2</sup> ja keskmiste sügavustega 0,8-1,1 meetrit. Kõik need vajumid paiknesid Estonia kaevanduse aladel, kus on maavara väljamiseks kasutatud tulptervikutega kamberkaevandamise tehnoloogiat. Vajumitest neli paiknesid põllumaal ja kolm metsaga kaetud aladel.

Töös selgus, et aerolaserskaneerimine on tõhus viis tuvastamiseks kaevandusvaringuid. Väga suure maa-ala kohta saab infot kiirelt ning suurte vajumite tuvastamisel on tulemused täpsed. Enamus maapinnamudeli vead tekkisid metsaga kaetud aladel. Neid aitaks vähendada, kui mõõdistust tehakse võimalikult varakult enne puude ja taimede kasvuperioodi algust. Samuti annaks täpsemad ja kiiremad tulemused tihedam LiDAR-i punktipilv, et maapinna kõrgust muudest taimedest ja objektidest paremini tuvastada. Avatud maastikul on maapinnamudelid kajastatud kõrgused täpsemad.

Antud töö tulemusi võiks kasutada vajumialade põhjalikumaks uuringuteks. Sellist vajumite uuringut võiks teha järjepidevalt, et saada teadmisi ja uusi andmeid maapinna muutustest peale kaevandustegevuse lõpetamist.

## **Possible applications of airborne laser scanning (ALS) data for exploring the impacts from oil shale mining**

### **Summary**

Since 2008 Estonian Land Board has been using airborne laser scanner (ALS) together with aerial photography for terrain mapping. ALS data allows to monitor natural and artificial processes that occur on the surface. For example, ALS data can be used to make infrastructural preliminary designs and modelling flood perils. ALS provides digital elevation model (DEM), which can be used to study industrial landscape.

In Estonia, the oil shale industry makes one of the largest impact on the environment and it has a big influence on the environmental and economical aspects. Underground mining may cause up to 1,5 meter deep subsidences and cause the change of the local water regime.

The purpose of this thesis is to use airborne laser scanning (also LiDAR) data to detect possible subsidences on top of underground mining sites. The inputs are terrain models from 2009 and 2013 (made by Estonian Land Board) with 5x5 meter accuracy. The study area is about 320 km<sup>2</sup> with 10 oil shale mines. The result of comparing these inputs is elevation variations, which may indicate to possible underground collapses.

The study showed that the LiDAR data automatic classification had most errors in forest areas when compared to calculated subsidences. The data is more precise in agricultural lands thanks to lack of trees. During the analysis, 7 subsidences were found that have high probability to be caused by underground mining. The size of these subsidences ranges from 12 000 to 40 000 m<sup>2</sup> and have an average depth of 0,7 to 1,1 meters. All subsidences are located on top of Estonia underground mine, four in agricultural and three in forest area.

The study also showed that airborne laser scanning is efficient way to detect mine collapses. The errors in forest areas can be reduced, when scanned earlier in the year, before the growing season of the trees and plants begin. Also, denser point cloud on LiDAR (which can be achieved by flying lower) would give more precise relief image.

## Kasutatud kirjandus

- Andersen, H. E., Reutebuch, S. E., McGaughy, R. J.** (2006) Active remote sensing. – *Computer applications in sustainable forest management*. /Koost. Shao, G., Reynolds, K. M. Holland: Springer, lk 43-66.
- Baltsavias, E. P.** (1999). Airborne laser scanning: basic relations and formulas. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54, lk 199–215.
- Eelsalu, M., Ellmann, A., Julge, K., Märdla, S., Soomere, T.** (2014). Rannaprotsesside anatoomia laserskaneerimise skalpelliga. – *Kaugseire Eestis. Artiklikogumik*. Tõravere: Tartu Observatoorium, lk 47-58.
- Eesti Vabariigi 2015. aasta maavaravarude koondbilansid. (2016). Tallinn: Maa-ameti geoloogia osakond. [http://geoportaal.maaamet.ee/docs/geoloogia/koondbilanss\\_2015.pdf?t=20160620143516](http://geoportaal.maaamet.ee/docs/geoloogia/koondbilanss_2015.pdf?t=20160620143516) (12.02.2016).
- Gruno, A.** (2008). Aerolaserskannerimisest Maa-ametis 2008. aastal. – *Geodeet 37 (61)*, lk 13–18.
- Gruno, A.** (2012). Üks pilt ütleb rohkem kui tuhat sõna ehk aerolaserskaneerimine Eestimaal. – *Horisont 4/2012*, lk 25-29.
- Järvet, V., Laos, H.** (2008). Käva kaevandus. – *90 aastat põlevkivi kaevandamist Eestis: tehnoloogia ja inimesed*. /Koost. Varb, N., Tambet, Ü. Tallinn: OÜ GeoTrail KS, lk 70-93.
- Kaarlõp, R., Sokman, K.** Põlevkivi kaevandamine. Kaevandamisest Iisaku valla territooriumil. [http://www.iisaku.ee/img/image/EEK\\_ettekanne\\_011113.pdf](http://www.iisaku.ee/img/image/EEK_ettekanne_011113.pdf) (02.05.2017).
- Kattai, V., Saadre, T., Savitski, L.** (2000). Eesti põlevkivi: geoloogia, ressurss, kaevandamistingimused. Tallinn: Akadeemia trükk, 226 lk.
- Kaup E., Nugis, K.** (2008). Kaevandus nr 4. – *90 aastat põlevkivi kaevandamist Eestis: tehnoloogia ja inimesed*. /Koost. Varb, N., Tambet, Ü. Tallinn: OÜ GeoTrail KS, lk 226-251.
- Kristaja, R., Rannus, M.** (2008). Kohtla kaevandus. – *90 aastat põlevkivi kaevandamist Eestis: tehnoloogia ja inimesed*. /Koost. Varb, N., Tambet, Ü. Tallinn: OÜ GeoTrail KS, lk 110-133.
- Küttis, E., Männiste, H-A.** (2008). Tammiku kaevandus. – *90 aastat põlevkivi kaevandamist Eestis: tehnoloogia ja inimesed*. /Koost. Varb, N., Tambet, Ü. Tallinn: OÜ GeoTrail KS, lk 216-225.
- Lang, M., Arumäe, T.** (2014). Kaugseire praktilistes metsanduslikes rakendustes Eestis. – *Kaugseire Eestis. Artiklikogumik*. Tõravere: Tartu Observatoorium, lk 128-137.
- Leedu, E.** (2010). Langatused põllumaadel ja nende mõju põllukultuuride saagikusele. – *Maavarade kaevandamine ja puistangute rekultiveerimine*. /Koost. Kaar, E., Kiviste, K. Tallinn: Ecoprint, lk 290-300.
- Liblik, V., Toomik, A., Rätsep, A.** (2005). Suletud ja suletavate kaevanduste keskkonnamõju. – *Keskkond ja põlevkivi kaevandamine Kirde-Eestis*. /Koost. Liblik, V., Punning, J-M. Tallinn: Teaduste akadeemia kirjastus, lk 31-52.

Leica ALS50-II Airborne Laser Scanner Product Specification. (2007). <http://www.nts-info.com/inventory/images/ALS50-II.Ref.703.pdf> (26.02.2017).

**Läänelaid, A.** (2010). Maapinna langatuste mõju metsale. – *Maavarade kaevandamine ja puistangute rekultiveerimine*. /Koost. Kaar, E., Kiviste, K. Tallinn: Ecoprint, lk 271-287.

Maastikuseire kava perioodiks 2016-2025, seire tulemuste analüüs ja metoodika täiendamine. (2016). Tartu: Maaülikool, 86 lk.

Maa-ameti veebileht: Aerolaserskaneerimise kõrguspunktid. (2017a). <http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Topograafilised-andmed/Korgusandmed/LiDAR-korguspunktid-p499.html> (26.02.2017)

Maa-ameti veebileht: Kõrgusmodelid. (2017b). <http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Topograafilised-andmed/Korgusandmed/Korgusmodelid-p508.html> (26.02.2017)

Maa-ameti geoportaal. (2017c). <http://geoportaal.maaamet.ee> (26.02.2017)

**Meriste, M., Sepp, K., Tomson, P., Vain, A.** (2016). Aerolaserskaneerimise (ALS) andmestiku kasutamisevõimalustest Lahemaa ja Karula rahvusparki kultuurmaastike uurimisel. – *Kaugseire Eestis. Artiklikogumik*. Tõravere: Tartu Observatoorium, lk 67-82.

**Metsur, M.** (2012). LIDAR Leica ASL50-II. Eesti Maa-amet, Fotogramm-meetria osakond. [http://geoportaal.maaamet.ee/docs/2012\\_LIDAR.pdf](http://geoportaal.maaamet.ee/docs/2012_LIDAR.pdf) (25.02.2017).

**Mikson, V., Vaher, E., Viil, A.** (2008). Estonia kaevandus. – *90 aastat põlevkivi kaevandamist Eestis: tehnoloogia ja inimesed*. /Koost. Varb, N., Tambet, Ü. Tallinn: OÜ GeoTrail KS, lk 326-353.

**Niitlaan, E.** (2000). Kambritega kaevandatud alade maakatte muutuste hindamine aerofotodelt. – *Põlevkivi talutav kaevandamine. Konverentsi ettekannete teesid ja artiklid*. /Toimetaja Reinsalu, E. Tallinn: TTÜ Mäeinstituut, lk 34-36.

**Nikolai, V.** (2008). Ahtme kaevandus. – *90 aastat põlevkivi kaevandamist Eestis: tehnoloogia ja inimesed*. /Koost. Varb, N., Tambet, Ü. Tallinn: OÜ GeoTrail KS, lk 162-201.

Põlevkivi kasutamise riikliku arengukava 2016-2030 koostamiseks vajalike andmete analüüs. (2012). OÜ Inseneribüroo STEIGER, 243 lk.

**Prima, L.** (2008). Kukruse kaevandus. – *90 aastat põlevkivi kaevandamist Eestis: tehnoloogia ja inimesed*. /Koost. Varb, N., Tambet, Ü. Tallinn: OÜ GeoTrail KS, lk 30-47.

**Prima, L., Hiiekivi, T.** (2008) Viru kaevandus. – *90 aastat põlevkivi kaevandamist Eestis: tehnoloogia ja inimesed*. /Koost. Varb, N., Tambet, Ü. Tallinn: OÜ GeoTrail KS, lk 280-299.

**Rull, E., Liblik, V., Pensa, M.** (2005). Muutused deformeerunud maapinnaga metsaalade taimkattes. – *Keskond ja põlevkivi kaevandamine Kirde-Eestis*. /Koost. Liblik, V., Punning, J-M. Tallinn: Teaduste akadeemia kirjastus, lk 88-101.

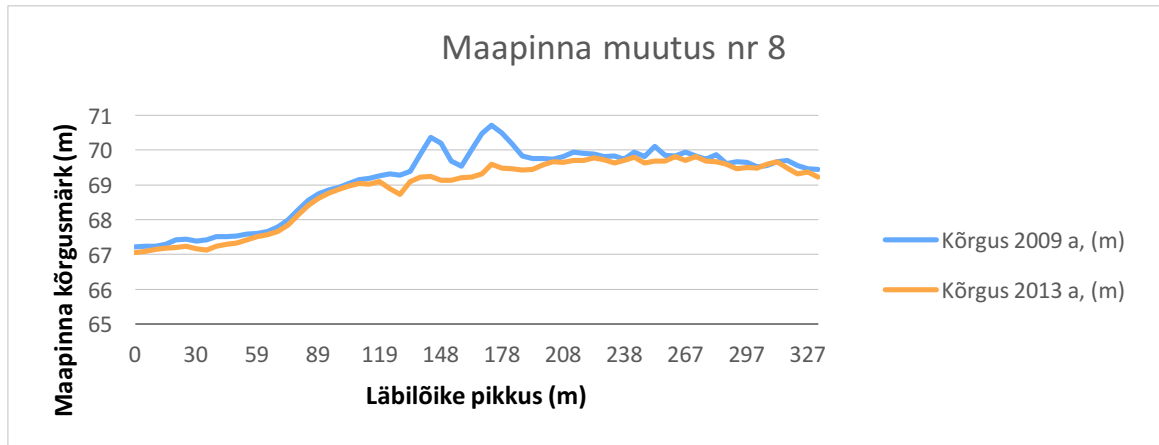
**Reinsalu, E.** (2010a). Põlevkivi ja selle kasutamine. – *Maavarade kaevandamine ja puistangute rekultiveerimine*. /Koost. Kaar, E., Kiviste, K. Tallinn: Ecoprint, lk 6-14.

- Reinsalu, E.** (2010b). Põlevkivi allmaakaevandamise mõju keskkonnale. – *Maavarade kaevandamine ja puistangute rekultiveerimine*. /Koost. Kaar, E., Kiviste, K. Tallinn: Ecoprint, lk 267-270.
- Reinsalu, E.** (2011). Eesti Mäendus. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 186 lk.
- Reinsalu, E., Toomik, A., Valgma, I.** (2002). Kaevandatud maa. Tallinn: TTÜ Mäeinstituut, 97 lk.
- Soosalu, H.** (2009). Aruanne riikliku keskkonnaseire allprogrammi “Seismiline seire” täitmisest 2008. aastal. Tallinn: Eesti Geoloogiakeskus.
- [http://eelis.ic.envir.ee/seireveeb/aruanded/8875\\_2008seismoaruanne.pdf](http://eelis.ic.envir.ee/seireveeb/aruanded/8875_2008seismoaruanne.pdf) (21.03.2017)
- Surva, J.** (2008). Sompka kaevandus-lõpetamata ajalugu. – *90 aastat põlevkivi kaevandamist Eestis: tehnoloogia ja inimesed*. /Koost. Varb, N., Tambet, Ü. Tallinn: OÜ GeoTrail KS, lk 134-161.
- Tohver, V., Raag, H.** (2008). Kaevandus nr 2. – *90 aastat põlevkivi kaevandamist Eestis: tehnoloogia ja inimesed*. /Koost. Varb, N., Tambet, Ü. Tallinn: OÜ GeoTrail KS, lk 202-215.
- Toomik, A.** (1999). Allmaakaevandamise mõjud maapinnale ja nende hindamine. – *Põlevkivi kaevandamise ja töötlemise keskkonnamõjud Kirde-Eestis*. /Koost. Liblik, V., Punning, J-M. Tallinn: Teaduste akadeemia kirjastus, lk 109-129.
- Toomik, A., Liblik, V.** (1998). Oil shale mining and processing impact on landscape in north-east Estonia. – *Landscape and Urban Planning*. Nr 41, lk 285-292.
- Vain, A.**, (2008). Aerolaserskaneerimisest saadud maapinna kõrgusmodeli täpsuse hindamine. – *Geodeet* 36 (60), lk 38–41.
- Vain, A.**, (2011). Aerolaserskaneerimise tööprintsip ja vigade päritolu – lühike kokkuvõte. – *Geodeet* 41 (65), lk 77–80.
- Väizene, V.** (2015). Põlevkivi altkaevandatud alade planšettide digitaliseerimine ja stabiilsushinnangu andmine. Tallinn, 11 lk.
- Väizene, V., Pastarus, J., Valgma, I.** (2014). Ida-Virumaa põlevkivi kaevandamisalade ruumilise planeeringu hinnang. Tallinn: TTÜ Mäeinstituut. <https://www.researchgate.net/publication/283053056>
- Valgma, I., Västriik, A.** (2006). Põlevkivi kaevandamise võimalikud tehnoloogiad. – *90 aastat põlevkivi kaevandamist Eestis*. / Koost. Valgma, I. Tallinn. lk 30-41.

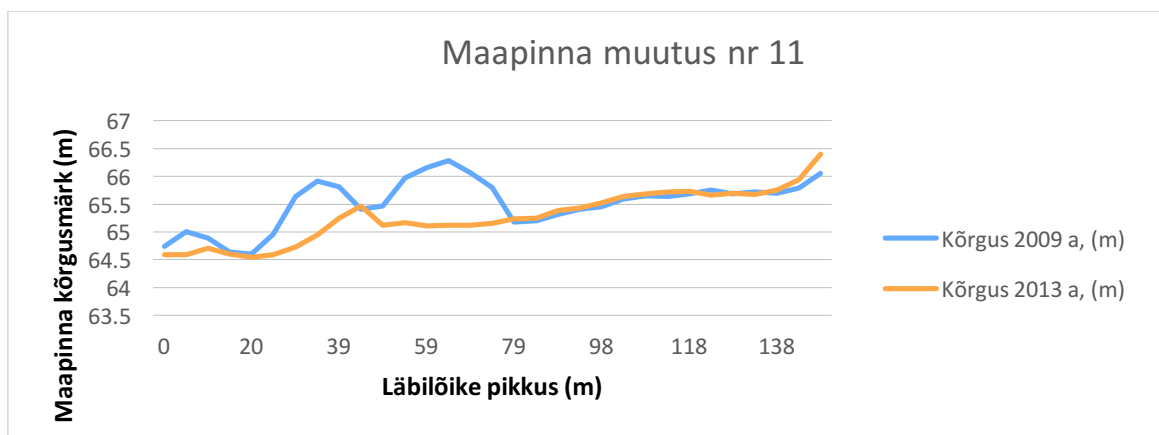
**LISAD**



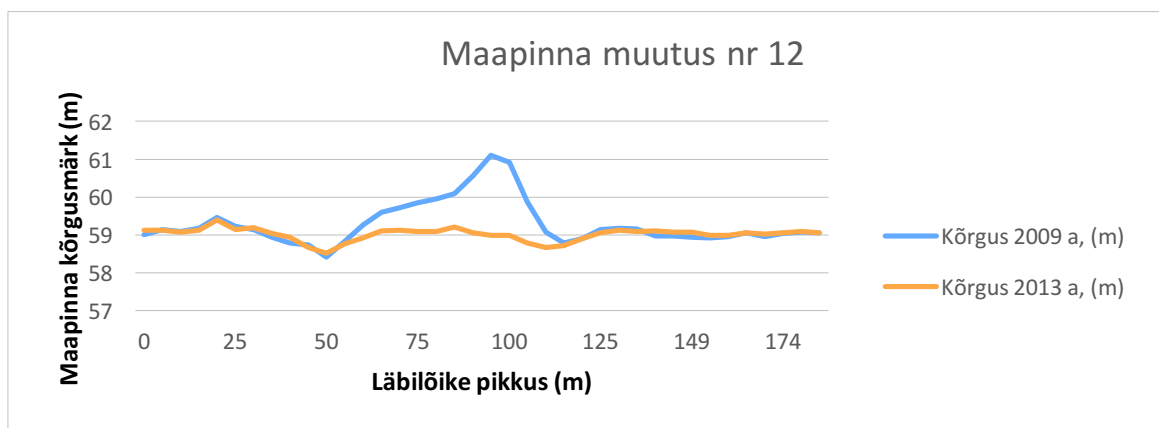
## Lisa 1. Estonia kaevandusala reljeefi muutuste profiilid



Joonis 24. Ala nr 8 profiil.

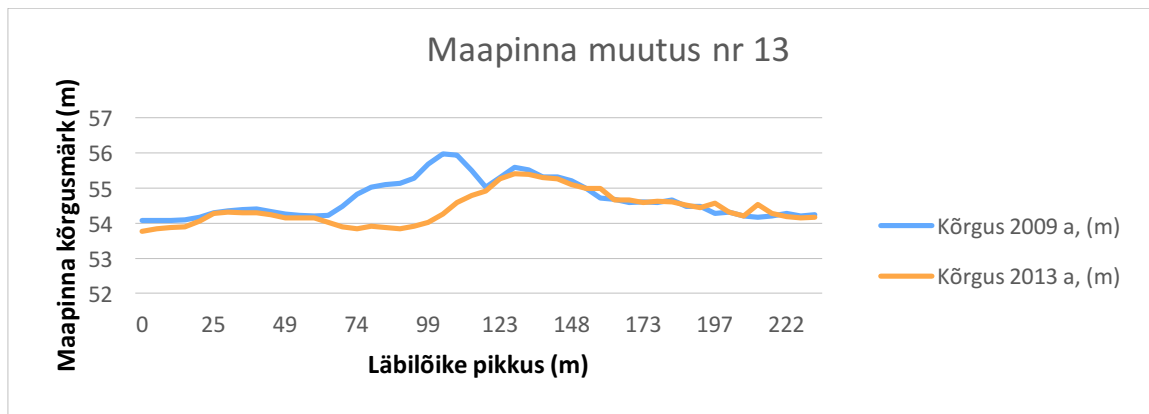


Joonis 25. Ala nr 11 profiil.

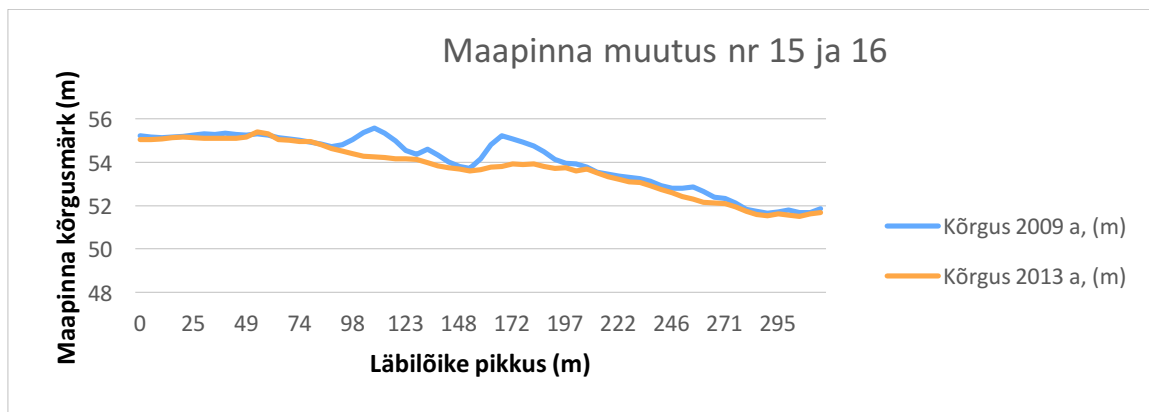


Joonis 26. Ala nr 12 profiil.

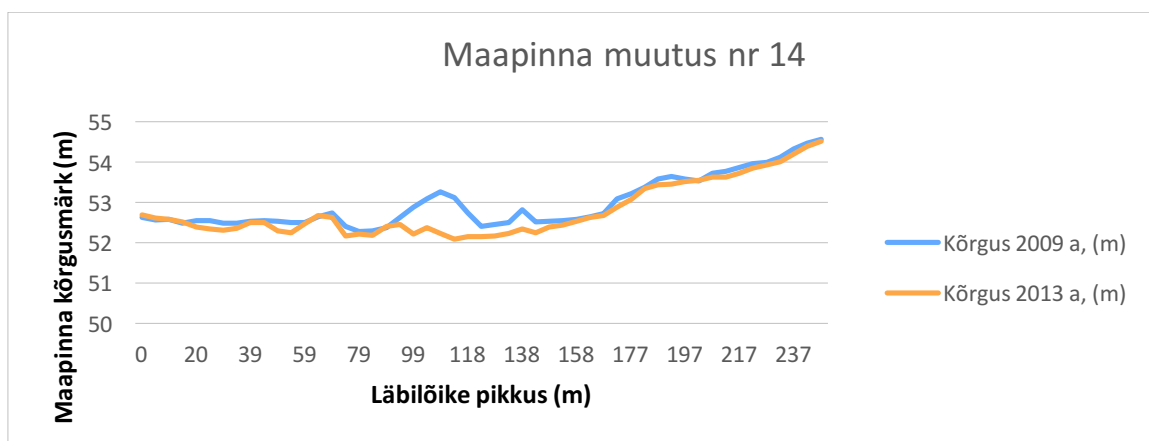
## Lisa 1 järg



Joonis 27. Ala nr 13 profiil.

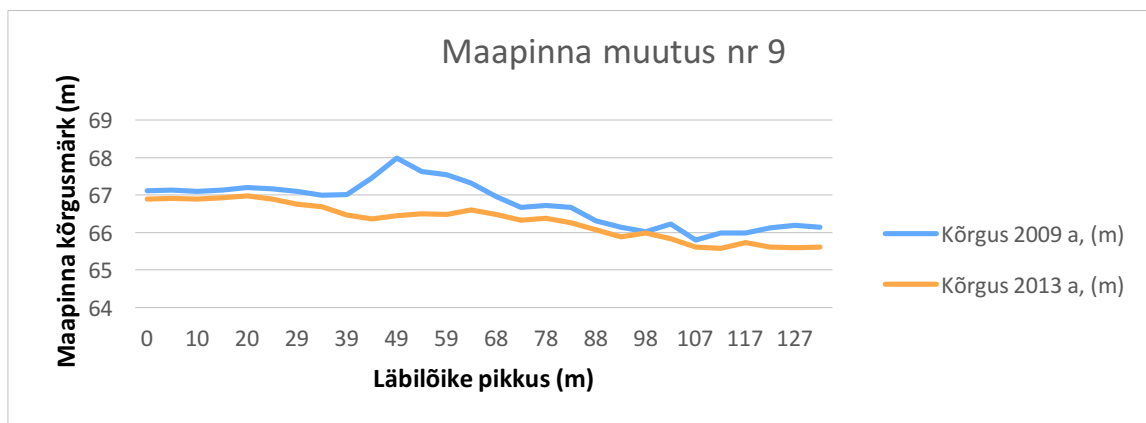


Joonis 28. Alade nr 15 ja 16 profiil.

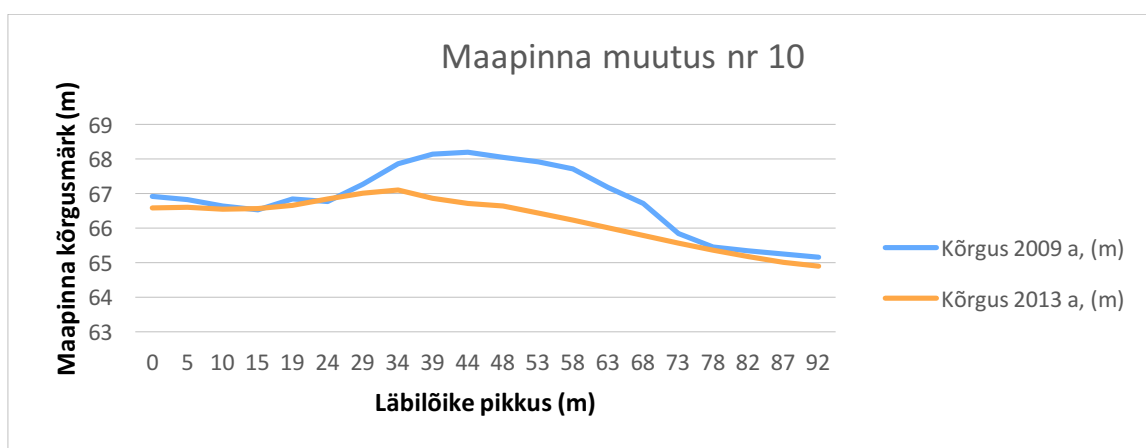


Joonis 29. Ala nr 14 profiil.

## Lisa 1 järg

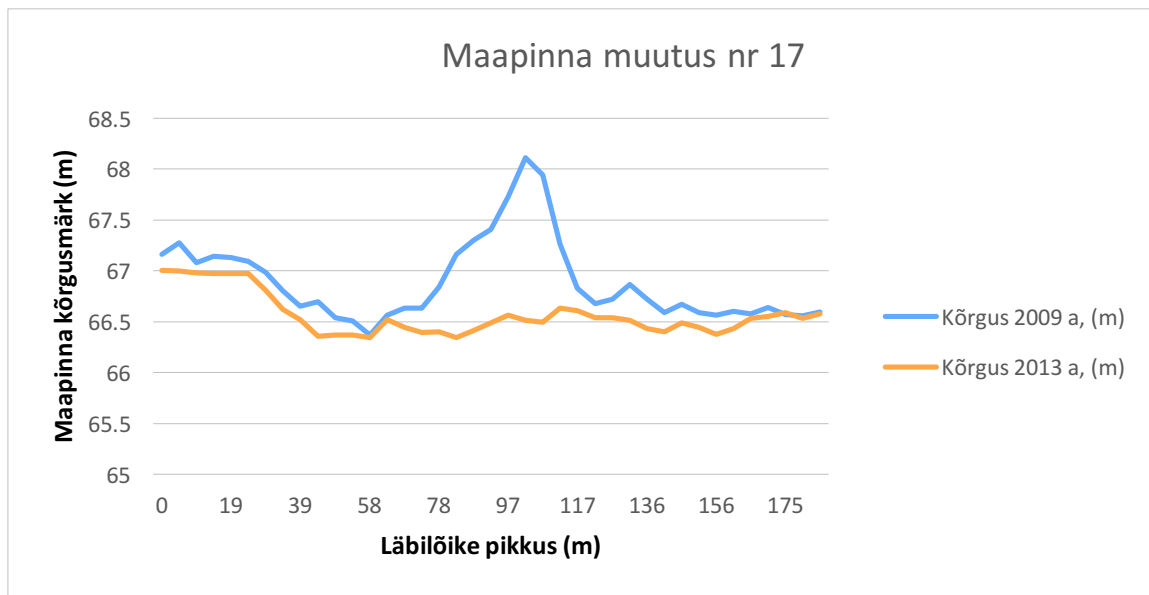


**Joonis 30.** Ala nr 9 profiil.



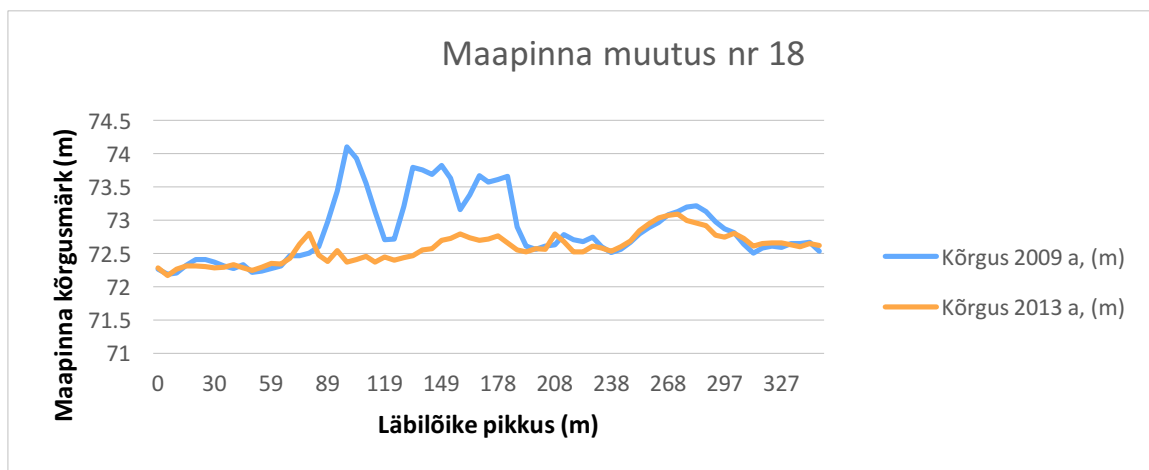
**Joonis 31.** Ala nr 10 profiil.

## Lisa 2. Sompa kaevanduse ala reljeefi muutuse profiil

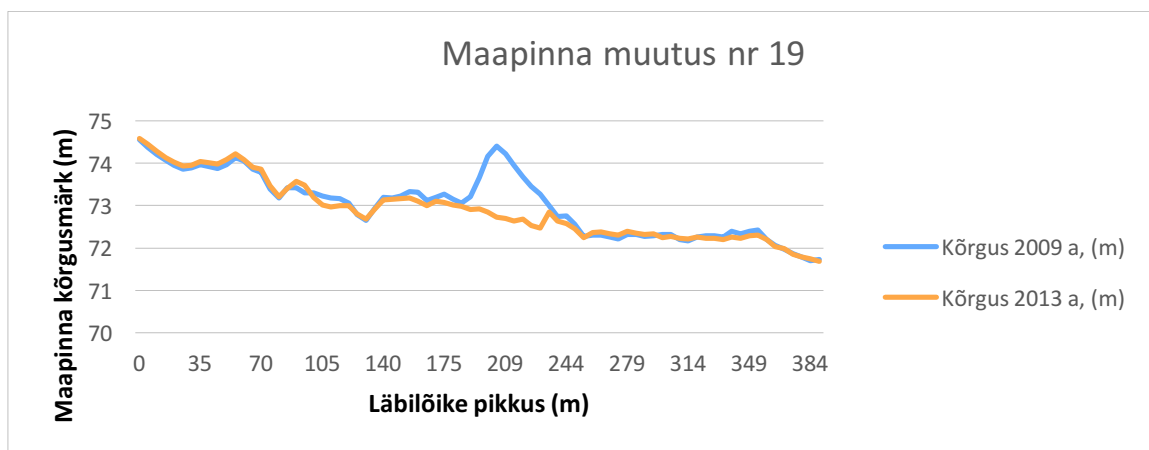


Joonis 32. Ala nr 17 profiil.

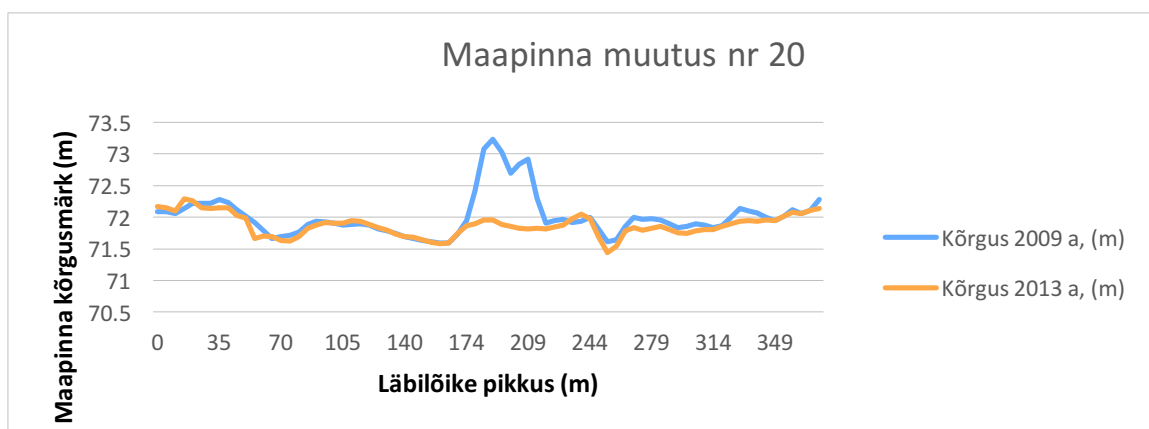
### Lisa 3. Tammiku kaevandusala reljeefi muutuste profiilid



Joonis 33. Ala nr 18 profiil.

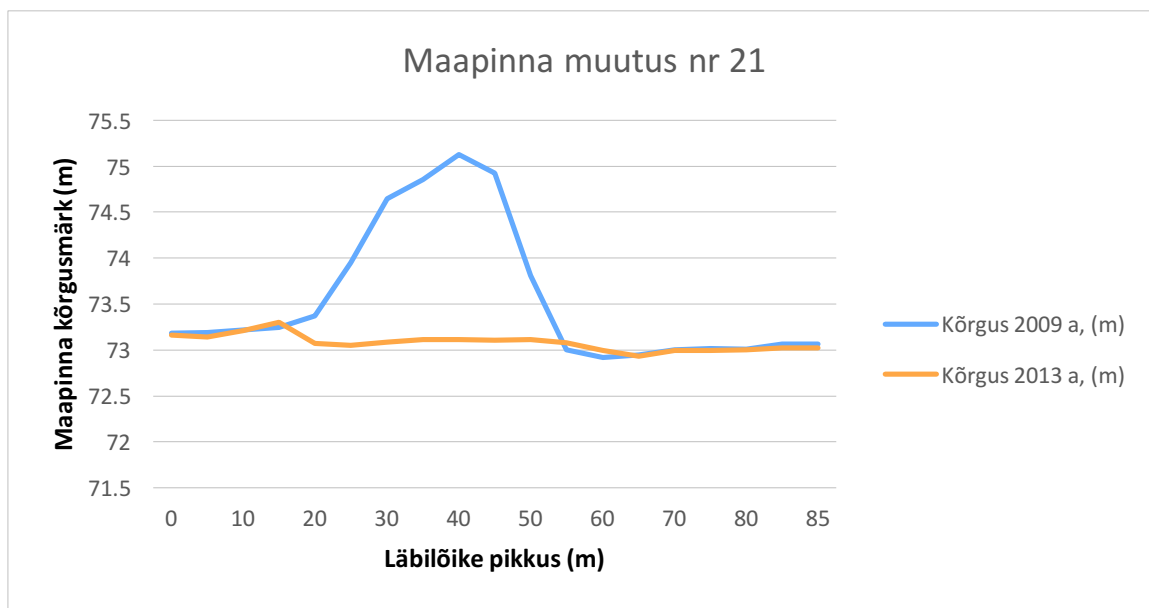


Joonis 34. Ala nr 19 profiil.

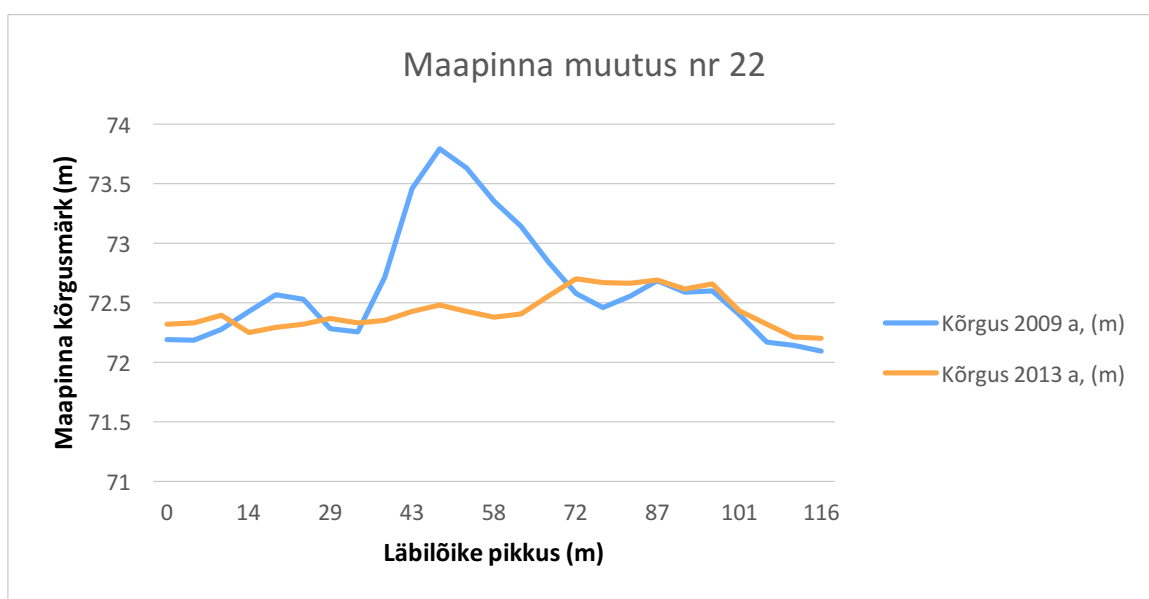


Joonis 35. Ala nr 20 profiil.

#### Lisa 4. Kaevandus nr 2 ala reljeefi muutuse profiilid



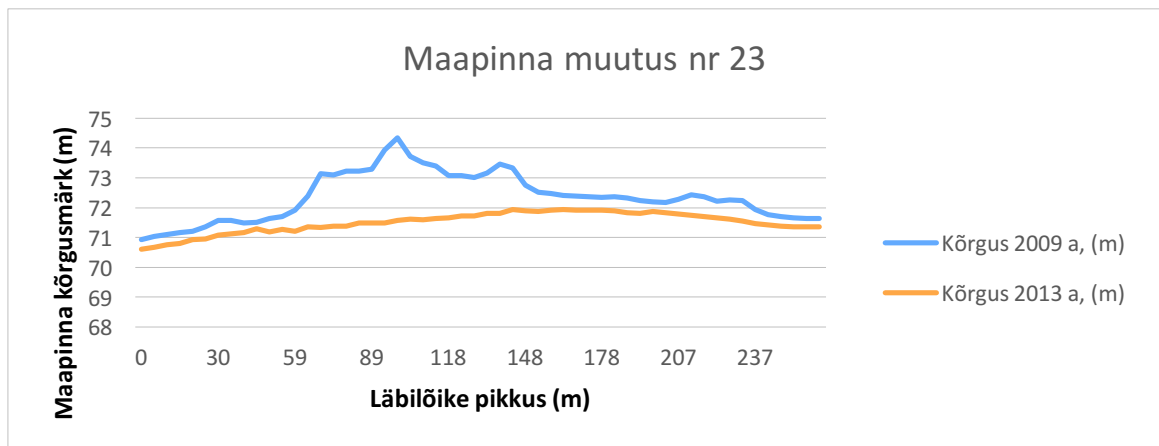
Joonis 36. Ala nr 21 profiil.



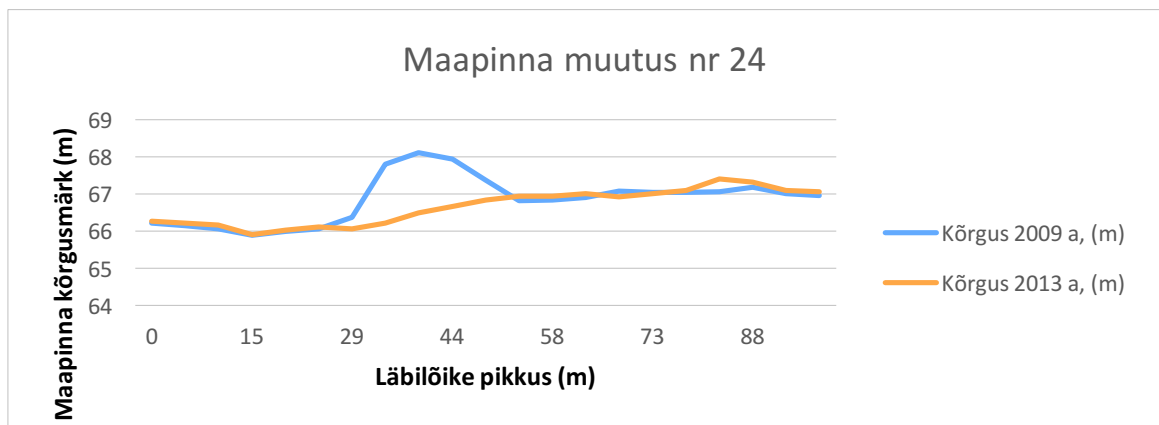
Joonis 37. Ala nr 22 profiil.



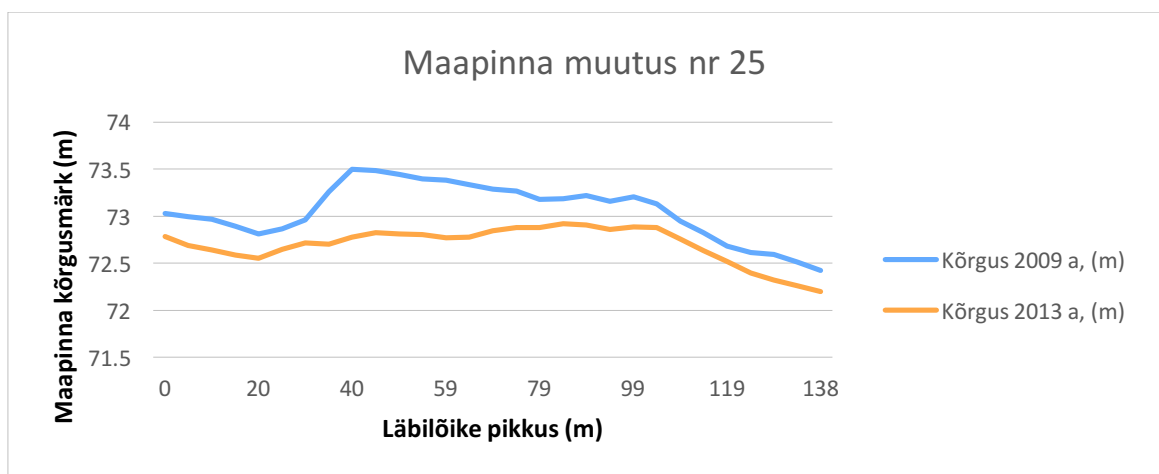
## Lisa 5. Kukuruse kaevandusala reljeefi muutuse profiilid



Joonis 38. Ala nr 23 profiil.

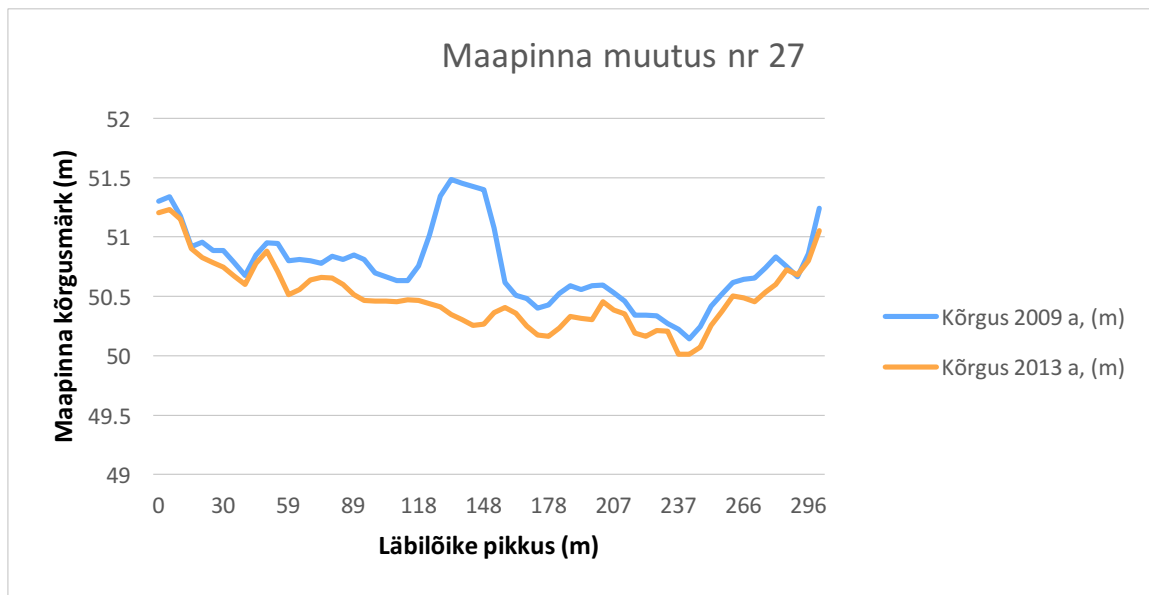


Joonis 39. Ala nr 24 profiil.



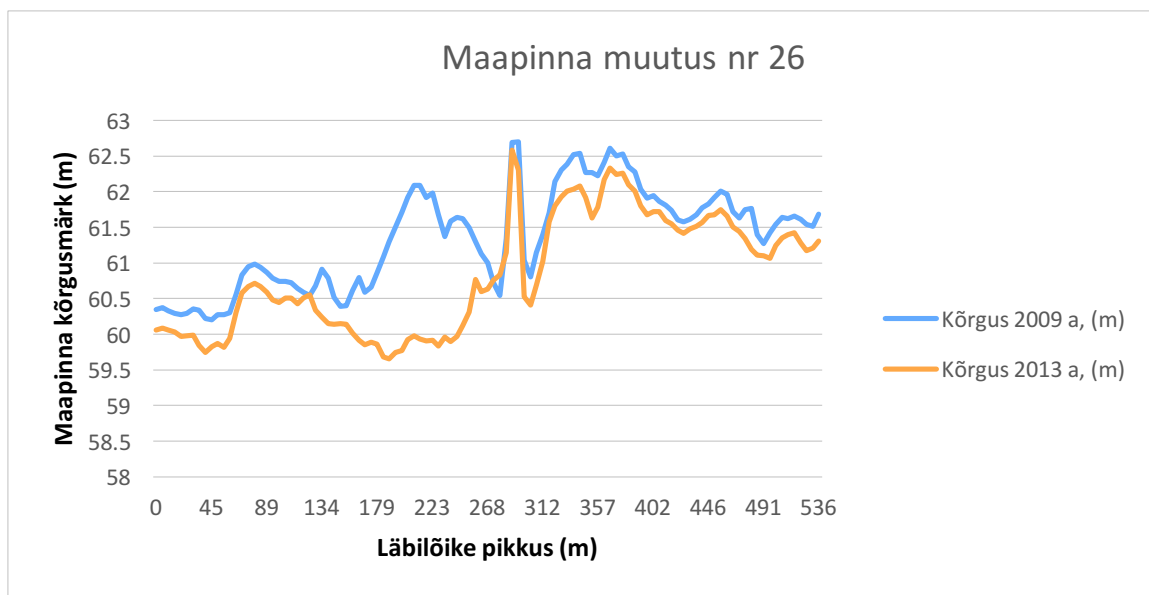
Joonis 40. Ala nr 25 profiil.

## Lisa 6. Kohtla kaevandusala reljeefi muutuse profiil



Joonis 41. Ala nr 27 profiil.

## Lisa 7. Käva kaevandusalal reljeefi muutuse profiil



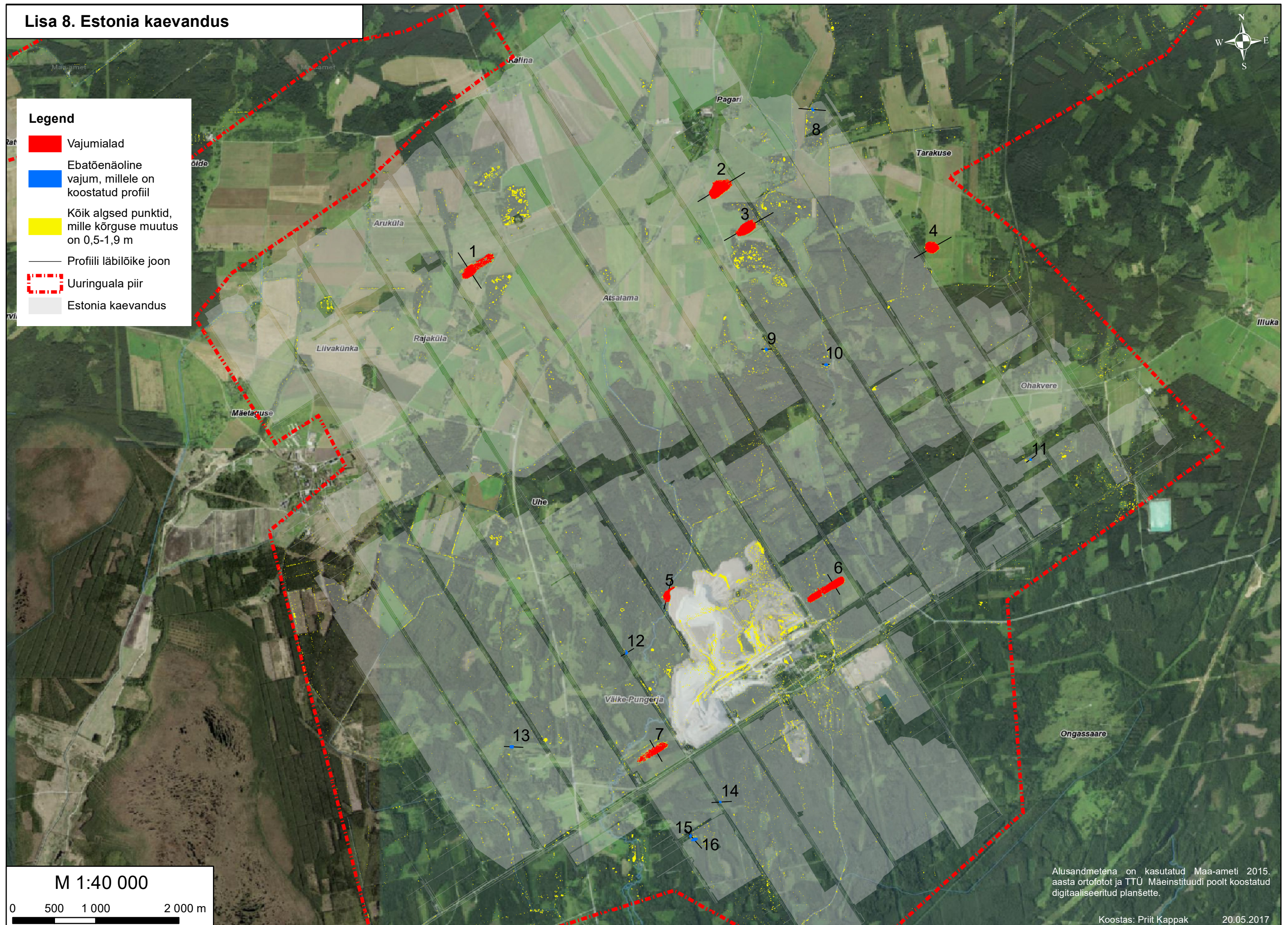
Joonis 42. Ala nr 26 profiil.



## Lisa 8. Estonia kaevandus

### Legend

- Vajumialad
- Ebatõenäoline vajum, millele on koostatud profiil
- Kõik algsed punktid, mille kõrguse muutus on 0,5-1,9 m
- Profiili läbilõike joon
- Uuringuala piir
- Estonia kaevandus



Alusandmetena on kasutatud Maa-ameti 2015. aasta ortofotot ja TTÜ Mäeinstituudi poolt koostatud digitaalseeritud planšette.

Koostas: Priit Kappak 20.05.2017



**Legend**

- Vajumialad
- Ebatõenäoline vajum, millele on koostatud profiil
- Kõik algsed punktid, mille kõrguse muutus on 0,5-1,9 m
- Profili läbilõike joon
- Uuringuala piir
- Sompka kaevandus

**M 1:30 000**

0 250 500 1 000 m

Alusandmetena on kasutatud Maa-ameti 2015. aasta ortofotot ja TTÜ, Mäeinstituudi poolt koostatud digitaalseeritud plansette.

Koostas: Priit Kappak 20.05.2017

Alusandmetena on kasutatud Maa-ameti 2015. aasta ortofotot ja TTÜ, Mäeinstituudi poolt koostatud digitaaliseeritud plansette.

Koostas: Priit Kappak

20.05.2017

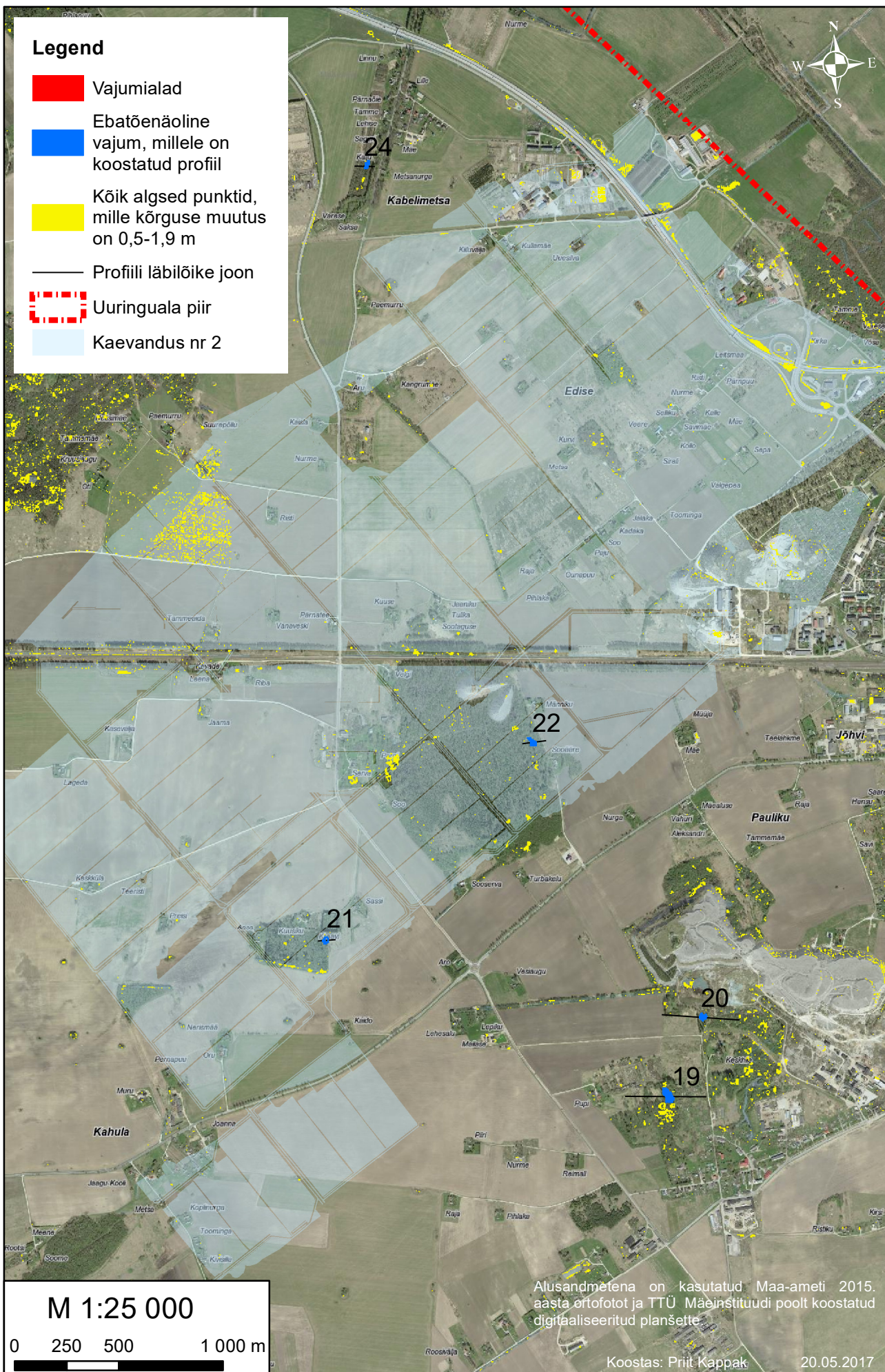


## Lisa 10. Tammiku kaevandus



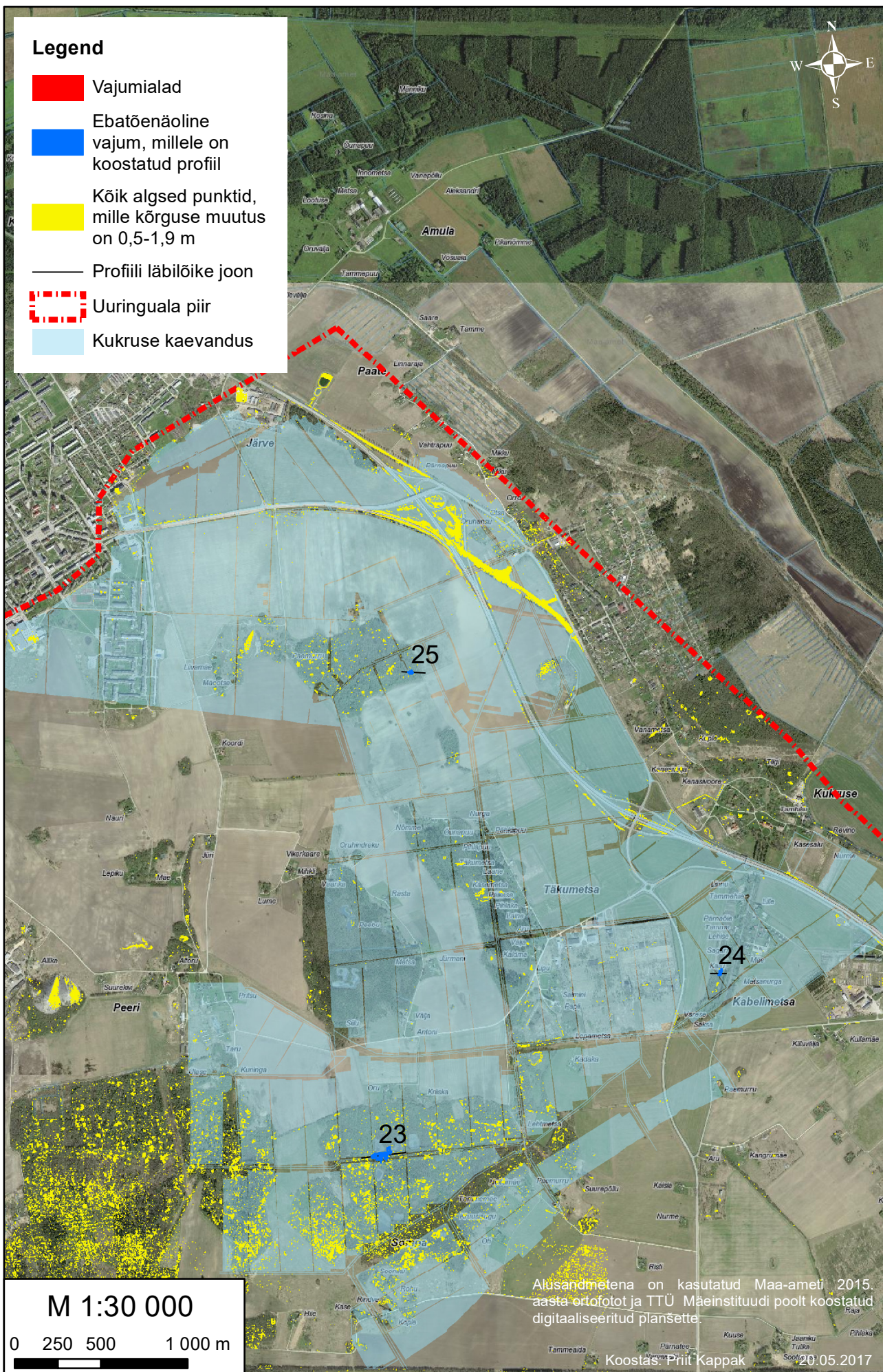


## Lisa 11. Kaevandus nr 2



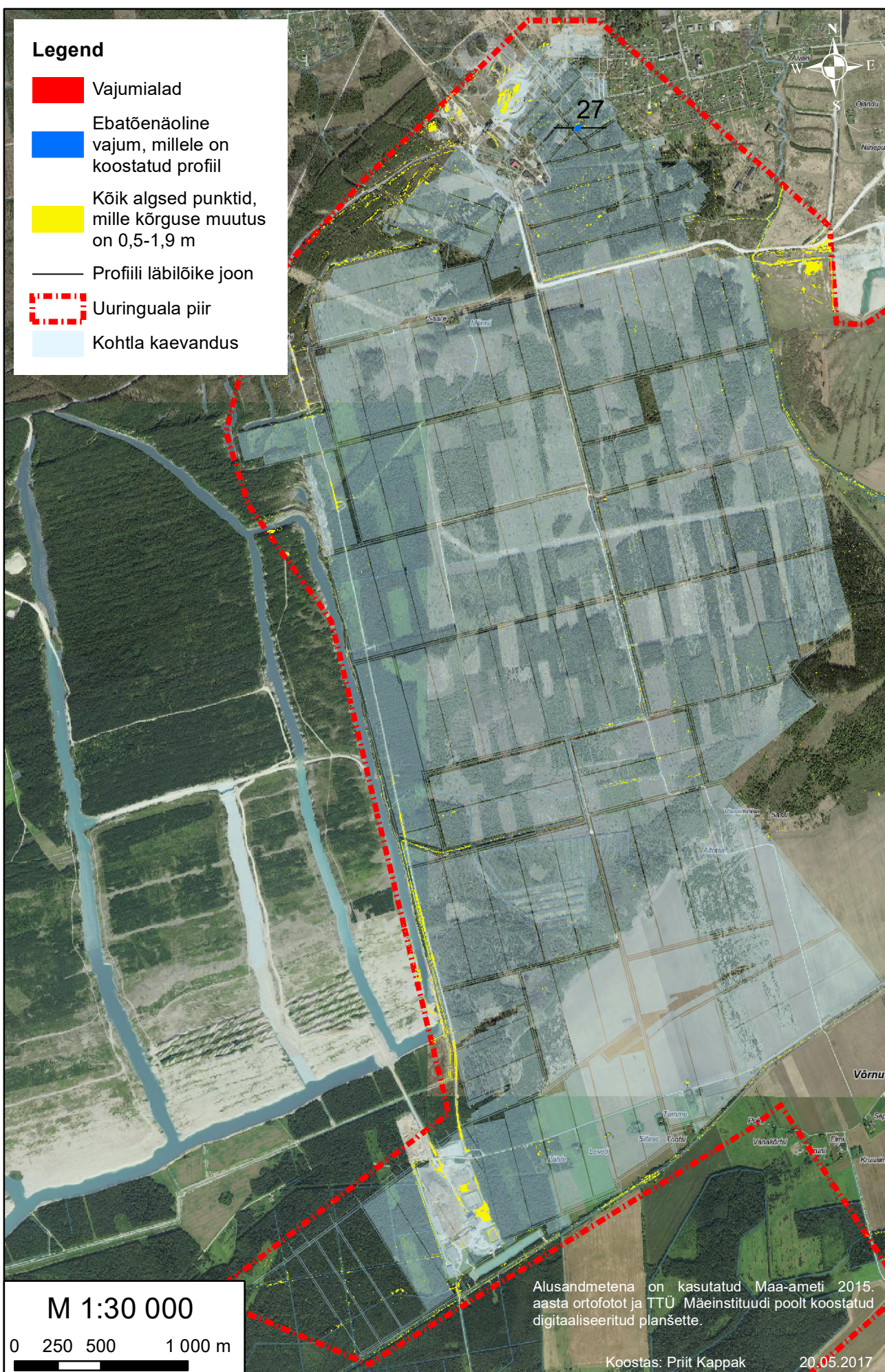


## Lisa 12. Kukruse kaevandus



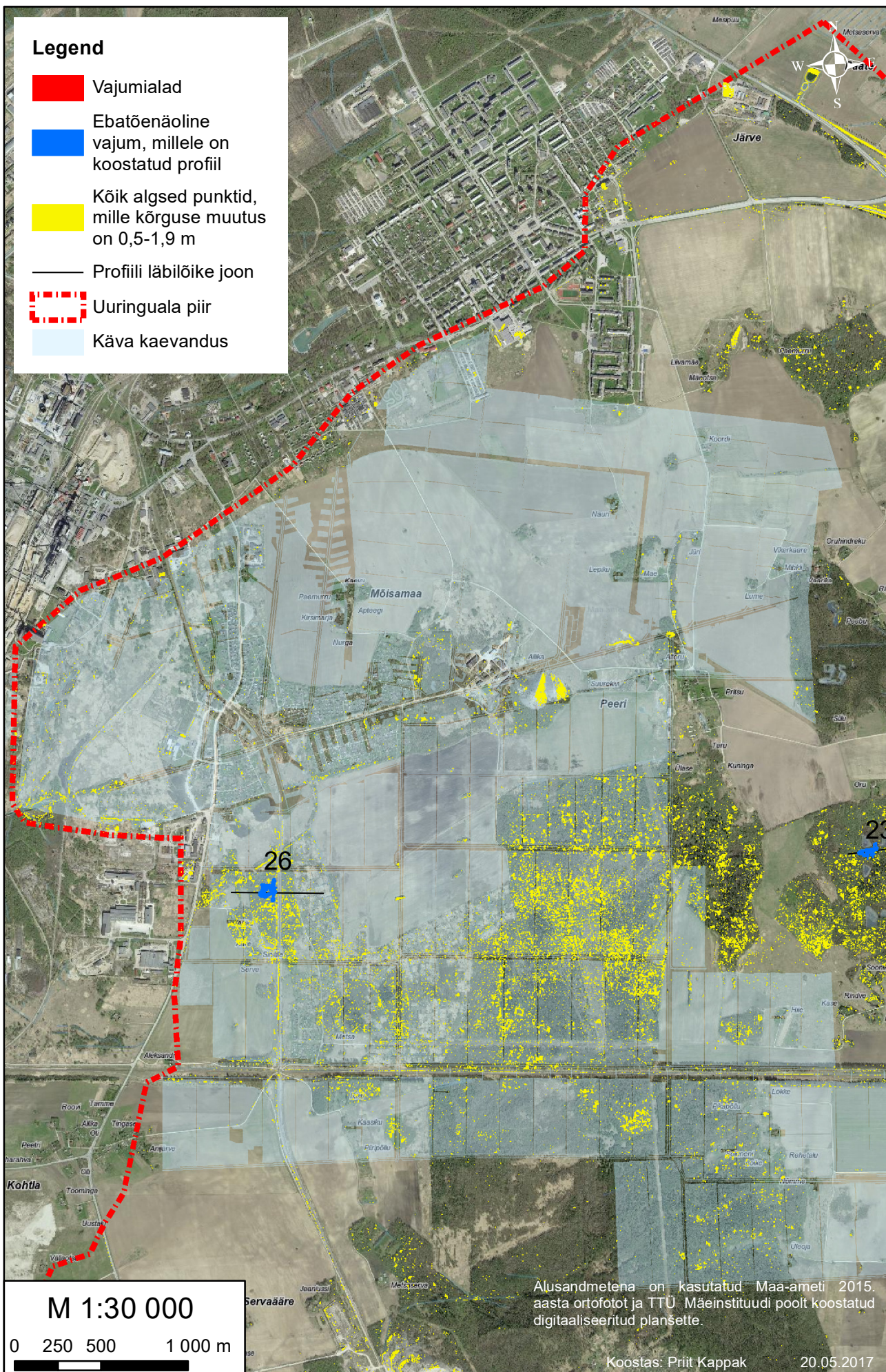


## Lisa 13. Kohtla kaevandus



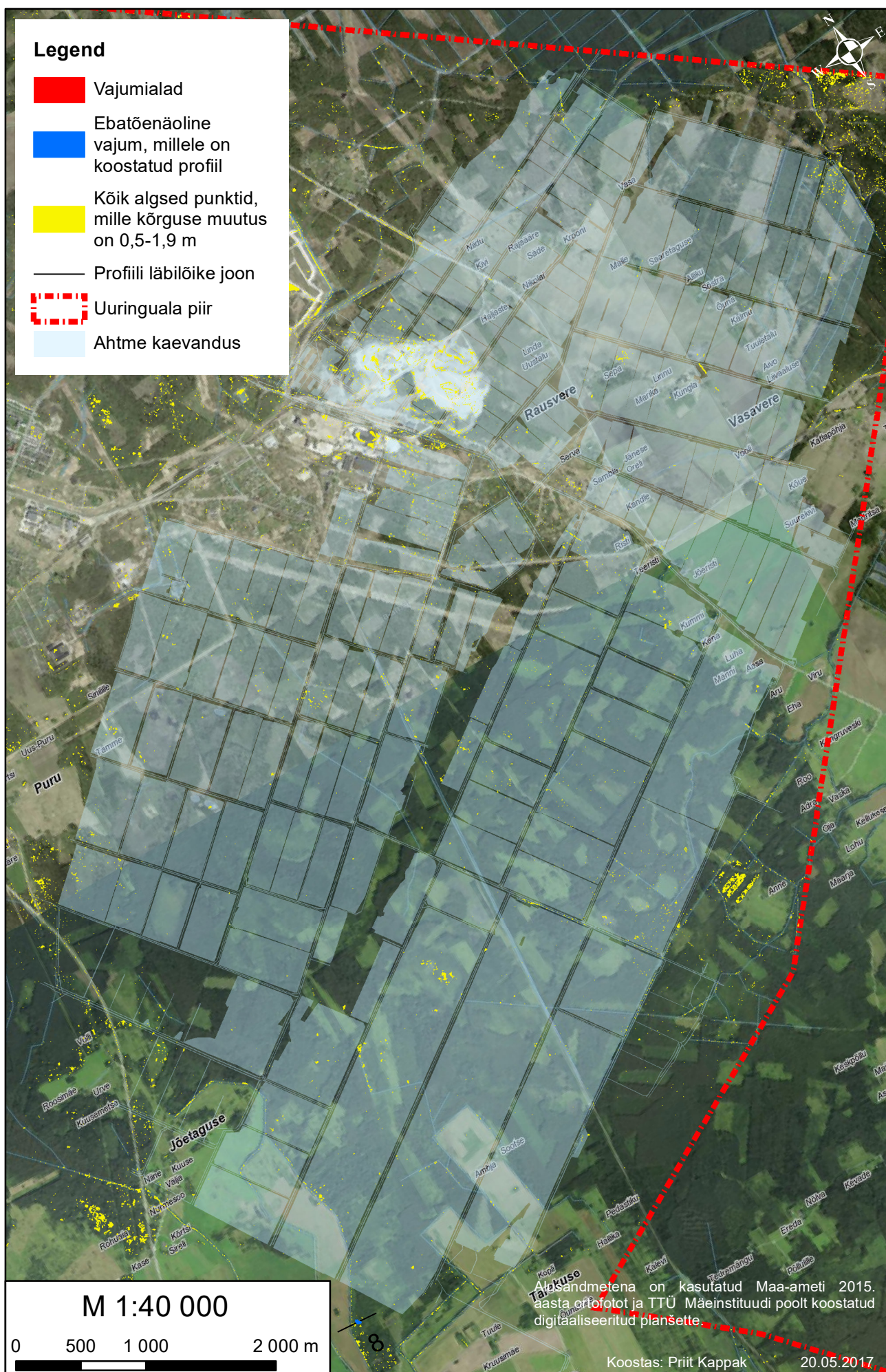


## Lisa 14. Käva kaevandus



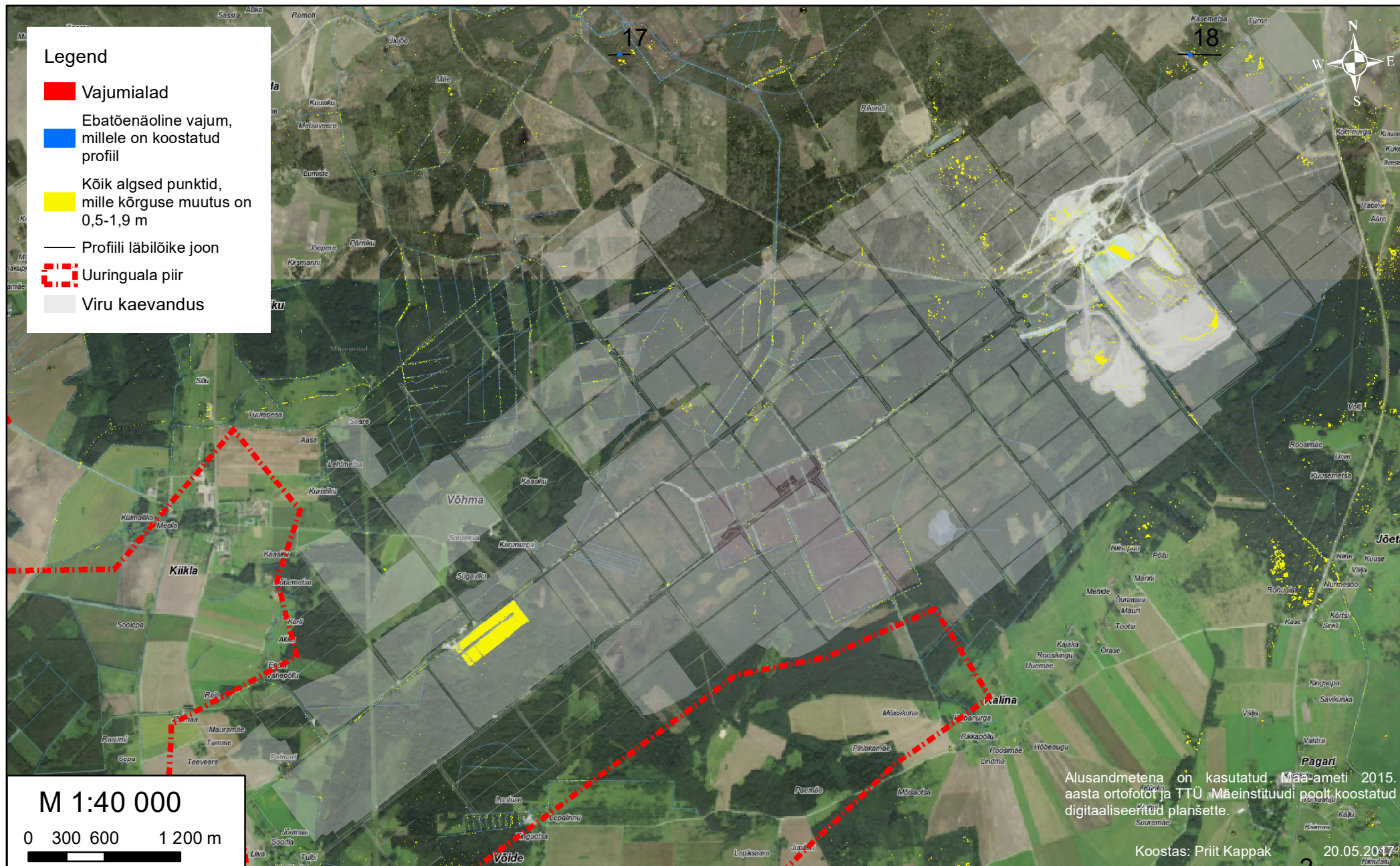


## Lisa 15. Ahtme kaevandus



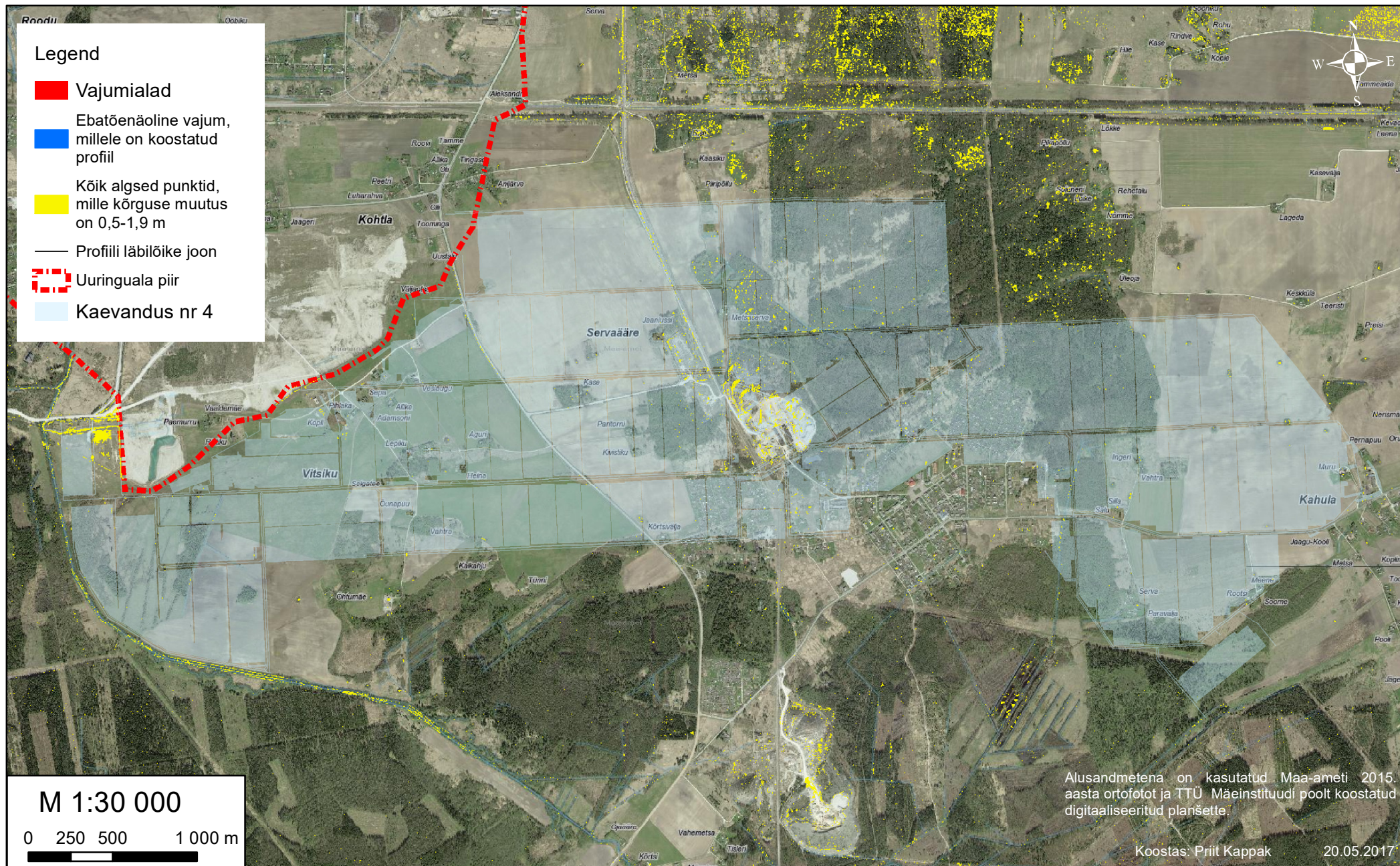


## Lisa 16. Viru kaevandus





## Lisa 17. Kaevandus nr 4





**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks  
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, **Priit Kappak (29.09.1988)**

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö  
**Aerolaserskaneerimise (ALS) andmestiku kasutamisevõimalustest põlevkivi  
kaevandamise mõjude uurimisel,**  
mille juhendaja on Kalev Sepp

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega  
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

\_\_\_\_\_

allkiri

Tartu, 22.05 2017

---

**Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)